تغییرات رابطه بارش– رواناب تحت تأثیر اقلیم و توسعه شهری در حوضه کن تهران: رویکرد هوش مصنوعی تبیین‌پذیر

مرتضی شکری

استادیار گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. M.Shokri@basu.ac.ir

دریافت: بازنگری: پذیرش: انتشار:

چکیده

تغییرات اقلیمی و توسعه شهری از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر دگرگونی رفتار هیدرولوژیکی حوضه‌های شهری به‌شمار می‌روند؛ با این حال، تفکیک سهم نسبی این دو عامل در تغییر رابطه بارش–رواناب همچنان یکی از چالش‌های اصلی مطالعه‌های هیدرولوژی شهری است. هدف این پژوهش، تحلیل تغییرات رابطه بارش–رواناب در حوضه رودخانه کن تهران و بررسی نقش نسبی تغییرپذیری اقلیم و توسعه شهری با بهره‌گیری از رویکرد هوش مصنوعی تبیین‌پذیر است. به این منظور، داده‌های هیدرولوژیکی و اقلیمی به‌همراه شاخص‌های استخراج‌شده از سنجش‌ازدور و نمایه‌های مرتبط با توسعه شهری گردآوری شد. پس از بررسی روندهای زمانی و ناایستایی سامانه، مدل‌های یادگیری ماشین برای شبیه‌سازی پاسخ رواناب در شرایط متغیر محیطی توسعه یافتند. سپس از روش SHAP برای ارزیابی اهمیت نسبی متغیرها و تبیین الگوی اثرگذاری آن‌ها بر خروجی مدل استفاده شد. نتایج این پژوهش با فراتر رفتن از تحلیل‌های رایج روند، نشان داد که رابطه بارش–رواناب در حوضه کن تحت تأثیر یک گسست ساختاری غیرخطی قرار گرفته است. نوآوری اصلی این مطالعه در تبیین وزن‌دهی‌شده متغیرها توسط تحلیل SHAP نهفته است که آشکار ساخت چگونه توسعه کالبدی با تغییر آستانه‌های نفوذپذیری، حساسیت حوضه به بارش‌های حدی را نسبت به دهه‌های گذشته به‌طور معناداری افزایش داده است؛ یافته‌ای که ضرورت بازنگری در طراحی سازه‌های هیدرولیکی بر اساس شرایط ناایستا را دوچندان می‌کند. با این حال، نتایج پژوهش باید به‌عنوان شواهد مبتنی بر مدل و نه اثبات قطعی روابط علّی تفسیر شوند. یافته‌های این مطالعه می‌تواند در مدیریت منابع آب شهری، ارزیابی اثر توسعه کالبدی بر پاسخ هیدرولوژیکی حوضه و طراحی راهبردهای سازگاری با تغییرات محیطی مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: ناایستایی هیدرولوژیکی، ارزیابی انتساب، یادگیری ماشین تفسیرپذیر،مقادیر SHAP ، آستانه‌های هیدرولوژیک.

مقدمه

رابطه بارش-رواناب یکی از بنیادی‌ترین مفاهیم در هیدرولوژی حوضه‌های آبریز محسوب می‌شود و شناخت تغییرات آن نقش مهمی در مدیریت منابع آب، برآورد سیلاب، طراحی سامانه‌های هیدرولیکی و برنامه‌ریزی توسعه سرزمین دارد. در رویکرد کلاسیک هیدرولوژی، معمولاً فرض می‌شود که پاسخ حوضه به محرک‌های اقلیمی در طول زمان از الگوی نسبتاً پایداری تبعیت می‌کند؛ با این حال، مطالعه‌های اخیر نشان داده‌اند که این فرض ایستایی در بسیاری از حوضه‌ها، به‌ویژه حوضه‌های شهری و در حال توسعه، دیگر قابل اتکا نیست (Salas et al., 2022). در این راستا، شناسایی و مدیریت رخدادهای حدی آب و هوا تحت شرایط ناایستایی (Nonstationary) برای مدیریت ریسک ضروری است (Slater et al., 2021). تغییر در ویژگی‌های اقلیمی، توسعه کاربری اراضی و مداخله‌های انسانی می‌توانند سازوکار تولید رواناب را تغییر داده و حساسیت سامانه هیدرولوژیکی را نسبت به ورودی‌های بارش دگرگون سازند (Blöschl et al., 2019).

در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین محرک‌های تحول رژیم‌های هیدرولوژیکی شناخته شده است. افزایش دمای جهانی، تغییر در الگوی زمانی و مکانی بارش و افزایش فراوانی رخدادهای حدی از جمله پیامدهایی هستند که مستقیماً بر رفتار رواناب اثر می‌گذارند (Allan et al., 2023). همچنین مطالعه‌ها نشان داده‌اند که رخدادهای بارش حدی نه تنها از نظر مقدار، بلکه از نظر شدت کوتاه مدت، تداوم و ساز وکارهای شکل‌گیری نیز در حال تغییر هستند (Gimeno et al., 2022). چنین تحولاتی می‌تواند موجب تغییر در زمان تمرکز، الگوی پاسخ سیلابی و ساختار رابطه بارش–رواناب شود؛ موضوعی که به‌ویژه در حوضه‌های کوهستانی و شهری اهمیت بیشتری پیدا می‌کند (Marchi et al., 2010; Gaume et al., 2016). برخی پژوهش‌ها نیز بر اهمیت درک ویژگی‌های اقلیمی بارش در مناطق نیمه‌خشک، نظیر ایران، برای پیش‌بینی دقیق‌تر این تغییرات تأکید ورزیده‌اند (Alijani & Harman, 2019).

با وجود این، پاسخ هیدرولوژیکی حوضه‌ها صرفاً تابع تغییرات اقلیمی نیست. مطالعه‌ها نشان داده‌اند که اثر اقلیم بر رواناب و سیلاب تحت تأثیر برهم‌کنش پیچیده‌ای از عوامل شامل ویژگی‌های زمین‌ریختی، رطوبت خاک، تبخیر-تعرق، ذخیره برف و شرایط کاربری اراضی قرار دارد؛ به‌همین دلیل روند تغییر رواناب الزاماً

همسو با روند تغییر بارش نیست (Merz et al., 2022; Blöschl et al., 2019). در واقع، پیوند میان چارچوب‌های هیدرولوژیکی و تغییرات سطح زمین می‌تواند تأثیر متقابل اقلیم و کاربری اراضی را بر فرآیندهای هیدرولوژیکی بهتر تبیین کند (Liu et al., 2021). در چنین شرایطی، تحلیل تغییر رابطه بارش-رواناب نیازمند رویکردهایی فراتر از تحلیل روند ساده متغیرهای هیدرواقلیمی است.

در کنار تغییرات اقلیمی، توسعه شهری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل انسانی مؤثر بر تحول پاسخ هیدرولوژیکی شناخته می‌شود. گسترش سطوح نفوذناپذیر، کاهش نفوذ، حذف پوشش گیاهی، تغییر مسیر زهکشی طبیعی و توسعه زیرساخت‌های شهری می‌توانند فرآیند تبدیل بارش به رواناب را به‌صورت معناداری تغییر دهند (Fletcher et al., 2013; Alshammari et al., 2023). مرورهای اخیر نشان می‌دهند که تغییرات پوشش و کاربری اراضی در محیط‌های شهری می‌تواند موجب افزایش شدت پاسخ روانابی، افزایش دبی اوج و تغییر رژیم جریان شود (Zhou et al., 2023). افزون بر این، همزمانی افزایش رخدادهای بارشی حدی با توسعه شهری ممکن است ریسک سیلاب‌های ناگهانی را تشدید کند (Li et al., 2021; Tamm et al., 2023).

در پاسخ به این پیچیدگی‌ها، طی سال‌های اخیر استفاده از روش‌های داده‌محور و یادگیری ماشین در مطالعه‌های هیدرولوژی گسترش یافته است. این روش‌ها توانایی مناسبی در استخراج روابط غیرخطی، شناسایی الگوهای پنهان و مدل‌سازی سامانه‌های پیچیده نشان داده‌اند (Kratzert et al., 2018; Kratzert et al., 2019). در این میان، استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی تغییرات مکانی-زمانی بارش و دما در مناطق نیمه‌خشک، از جمله ایران، نتایج نویدبخشی را به همراه داشته است (Avand et al., 2024). همچنین مطالعه‌های مروری بیان می‌کنند که مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین می‌توانند مکمل مؤثری برای رویکردهای فرایند محور باشند (Shen et al., 2018 a & b; Jiang et al., 2020). با این حال، افزایش دقت پیش‌بینی به‌تنهایی برای تبیین علمی فرآیندهای هیدرولوژیکی کافی نیست و تفسیر رفتار مدل‌ها همچنان یک چالش اساسی باقی مانده است (Nearing et al., 2021).

علاوه بر این، چالش اصلی در مدل‌سازی هیدرولوژیکی، انتخاب مدل‌های مناسب و مدیریت اثرات موروثی (Legacy effects) در داده‌ها و فرآیندهاست که می‌تواند بر دقت مدل‌سازی تأثیر بگذارد (Addor & Melsen, 2019).

مرور مطالعه‌های پیشین نشان می‌دهد که بیشتر پژوهش‌ها یا بر مدل‌سازی بارش—رواناب مبتنی بر متغیرهای هیدرواقلیمی متمرکز بوده‌اند، یا اثر تغییرات کاربری اراضی و توسعه شهری را به‌طور مستقل بررسی کرده‌اند (Panikkar et al., 2023; Tahroudi & Mirabbasi, 2024). با وجود پیشرفت روش‌های هوش مصنوعی تبیین‌پذیر، ادغام نظام‌مند این ابزارها برای تبیین هم‌زمان نقش عوامل اقلیمی و غیراقلیمی در تغییرپذیری پاسخ هیدرولوژیکی همچنان محدود است (Huang et al., 2024). از این‌رو، پژوهش حاضر با تلفیق تحلیل‌های ناایستایی، گسست ساختاری و XAI، به واکاوی دقیق‌تر تغییر رابطه بارش—رواناب در حوضه رودخانه کن تهران می‌پردازد.

در این راستا، هوش مصنوعی تبیین‌پذیر (Explainable Artificial Intelligence; XAI) به‌عنوان چارچوبی برای افزایش شفافیت مدل‌های پیچیده مطرح شده است. روش SHAP با اتکا بر نظریه بازی‌ها امکان ارزیابی سهم نسبی متغیرها در خروجی مدل را فراهم می‌کند و می‌تواند به درک بهتر سازوکارهای تغییر پاسخ هیدرولوژیکی کمک کند (Lundberg and Lee, 2017; Molnar, 2022). مطالعه‌های اخیر نشان داده‌اند که ترکیب یادگیری ماشین و روش‌های تبیین‌پذیر می‌تواند در تحلیل اثر عوامل اقلیمی و تغییرات کاربری اراضی بر سامانه‌های هیدرولوژیکی مؤثر باشد (Arriagada et al., 2024; Zhou et al., 2023).

با وجود پیشرفت‌های اخیر، سه شکاف پژوهشی همچنان باقی مانده است: نخست، بیشتر مطالعه‌های اثر تغییرات اقلیمی و توسعه شهری را به‌صورت جداگانه بررسی کرده‌اند؛ دوم، بخش قابل توجهی از پژوهش‌ها بر عملکرد پیش‌بینی مدل متمرکز بوده و تفسیر نقش نسبی متغیرها را مورد توجه قرار نداده‌اند؛ و سوم، مطالعه‌های محدودی از چارچوب‌های هوش مصنوعی تبیین‌پذیر برای تحلیل تغییرات بلندمدت رابطه بارش—رواناب در حوضه‌های شهری نیمه‌خشک استفاده کرده‌اند (Guo et al., 2020; Xu et al., 2022).

وجه افتراق و نوآوری اصلی پژوهش حاضر نسبت به مطالعه‌های پیشین، تلفیق تحلیل‌های ناایستایی زمانی و گسست ساختاری با چارچوب یادگیری ماشین تبیین‌پذیر (XAI) به‌منظور تفکیک غیرخطی سهم نسبی متغیرهای اقلیمی و توسعه شهری در مقیاس روزانه است. بر این اساس، این مطالعه با هدف تحلیل تغییرات رابطه بارش—رواناب در حوضه رودخانه کن تهران و ارزیابی نقش عوامل اثرگذار، داده‌های بلندمدت هیدرواقلیمی و شاخص‌های سنجش‌ازدور توسعه شهری را با بهره‌گیری از مدل‌های یادگیری ماشین و تحلیل SHAP تلفیق نموده است. این رویکرد نه‌تنها امکان کشف رفتارهای آستانه‌ای و برهم‌کنش‌های پیچیده حاکم بر تغییر پاسخ هیدرولوژیکی را در یک حوضه کوهستانی-شهری فراهم می‌سازد، بلکه ابزار دقیقی برای مدیریت منابع آب شهری و تدوین راهبردهای سازگاری با تغییرات محیطی ارائه می‌دهد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه کن یکی از حوضه‌های مهم واقع در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز مرکزی و در محدوده شمال‌غرب کلان‌شهر تهران است. این حوضه از نظر هیدرولوژیکی و

ژئومورفولوژیکی اهمیت قابل توجهی دارد، زیرا بخش قابل توجهی از رواناب‌های کوهستانی شمال تهران را زهکشی کرده و در مسیر پایین‌دست خود با مناطق شهری و نیمه‌شهری تهران در ارتباط مستقیم قرار می‌گیرد. رودخانه کن از ارتفاعات شمالی تهران سرچشمه گرفته و پس از عبور از نواحی کوهستانی وارد محدوده‌های شهری و پیرامون‌شهری می‌شود؛ از این‌رو رفتار هیدرولوژیکی این حوضه تحت تأثیر ترکیبی از فرآیندهای طبیعی کوهستانی و فشارهای ناشی از توسعه شهری قرار دارد.

این پژوهش در حوضه آبریز کن واقع در محدوده عرض‌های جغرافیایی ′۴۴°۳۵ تا ′۵۸°۳۵ شمالی و طول‌های جغرافیایی ′۵۱°۰۸ تا ′۲۵°۵۱ شرقی انجام شده است. مساحت این حوضه در حدود ۲۰۰ کیلومتر مربع برآورد می‌شود. موقعیت جغرافیایی حوضه و محل ایستگاه‌های مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است.

Fig. 1- Location of rain-gauge and meteorological stations in the study area

از نظر اقلیمی، حوضه کن در منطقه‌ای با اقلیم نیمه‌خشک کوهستانی قرار دارد. بخش عمده بارش سالانه در فصول سرد رخ می‌دهد و جریان رودخانه تا حد زیادی تحت تأثیر بارش‌های زمستانه و بهاره و همچنین ذوب برف در ارتفاعات بالادست شکل می‌گیرد. علاوه بر این، وقوع رگبارهای کوتاه‌مدت و شدید در فصول انتقالی، به‌ویژه در بهار و پاییز، می‌تواند منجر به افزایش سریع رواناب و شکل‌گیری سیلاب‌های ناگهانی شود.

از نظر فیزیوگرافی، حوضه دارای شیب‌های نسبتاً زیاد، دره‌های کوهستانی باریک و شبکه زهکشی متراکم است. این ویژگی‌ها موجب کاهش زمان تمرکز حوضه و افزایش سرعت پاسخ هیدرولوژیکی آن به بارش‌های شدید می‌شود؛ در نتیجه، بارش‌های رگباری کوتاه‌مدت می‌توانند در مدت زمان کوتاهی به افزایش قابل توجه دبی رودخانه منجر شوند و سیلاب‌های ناگهانی با دبی اوج بالا ایجاد کنند (Marchi et al., 2010; Gaume et al., 2016).

علاوه بر عوامل طبیعی، طی دهه‌های اخیر حوضه رودخانه کن تحت تأثیر گسترش کالبدی شهر تهران و تغییرات کاربری اراضی نیز قرار گرفته است. توسعه مناطق مسکونی، راه‌ها و زیرساخت‌های شهری در بخش‌هایی از حوضه موجب افزایش سطوح نفوذناپذیر و تغییر در الگوی طبیعی زهکشی شده است. چنین تغییراتی می‌تواند منجر به کاهش نفوذ آب در خاک، افزایش رواناب سطحی و تشدید پاسخ سیلابی حوضه شود. از این‌رو، حوضه کن نمونه‌ای مناسب برای بررسی تغییرات بلندمدت رابطه بارش—رواناب در حوضه‌های کوهستانی تحت تأثیر توسعه شهری محسوب می‌شود.

حوضه رودخانه کن به‌دلیل قرارگیری هم‌زمان در شرایط کوهستانی، پاسخ سریع هیدرولوژیکی و مجاورت با محدوده توسعه‌یافته کلان‌شهر تهران، نمونه مناسبی برای بررسی رفتار ناایستای رابطه بارش-رواناب تحت تأثیر هم‌زمان عوامل اقلیمی و انسانی محسوب می‌شود.

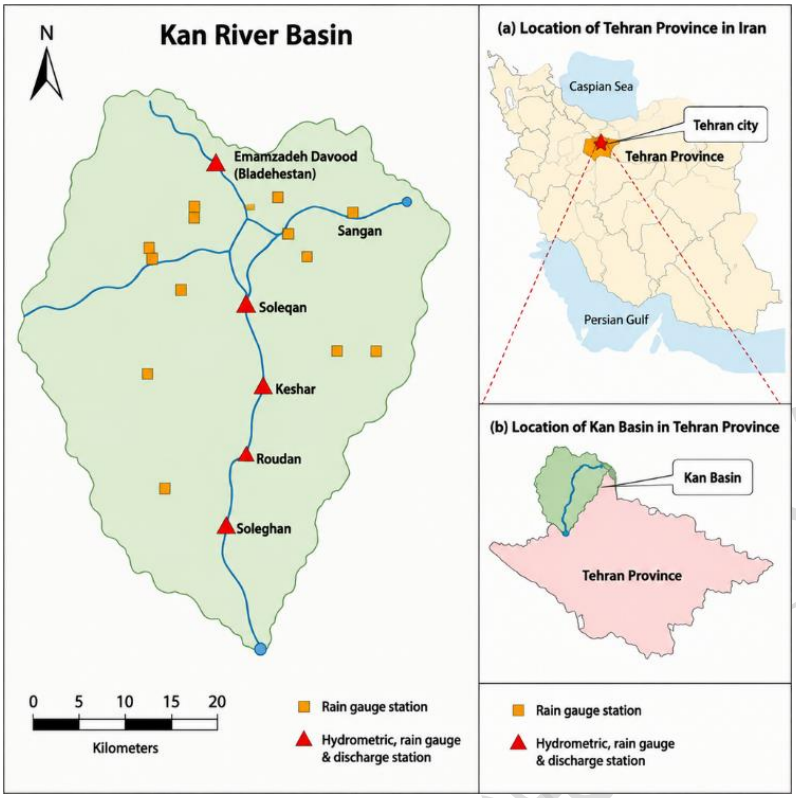


Fig. 1- Location of rain-gauge and meteorological stations in the study area

شکل ۱- موقعیت مکانی ایستگاههای بارانسنجی و هواشناسی منطقه مورد مطالعه

داده‌های مورد استفاده و پیش‌پردازش

به‌منظور تحلیل تغییرات بلندمدت رابطه بارش–رواناب، مجموعه‌ای از داده‌های هیدرولوژیکی، اقلیمی و شاخص‌های توسعه شهری گردآوری و یکپارچه‌سازی شد. انتخاب مقیاس زمانی روزانه با هدف حفظ پاسخ سریع هیدرولوژیکی حوضه و امکان بررسی رخدادهای کوتاه‌مدت انجام گرفت. علاوه بر داده‌های مشاهده‌ای، برخی متغیرهای مشتق‌شده نیز برای تقویت توان تبیین مدل استخراج شدند. مشخصات کامل داده‌ها، مقیاس زمانی و منابع مورد استفاده در Table 1- Data and variables used in the study

جدول ۱) ارائه شده است.

همان‌گونه که در Table 1- Data and variables used in the study

جدول ۱) مشاهده می‌شود، متغیرهای پژوهش در چهار گروه اصلی شامل داده‌های هیدرولوژیکی، اقلیمی، شاخص‌های توسعه شهری و ویژگی‌های فیزیوگرافی سازمان‌دهی شدند. این ترکیب داده‌ای با هدف پوشش هم‌زمان محرک‌های طبیعی و انسانی مؤثر بر تغییر رفتار رواناب انتخاب شد.

پیش از انجام تحلیل‌ها، کلیه داده‌ها از نظر پیوستگی زمانی، داده‌های مفقود، مقادیر پرت و سازگاری آماری مورد بررسی قرار گرفتند. داده‌های مفقود، در صورت مشاهده، بر اساس ساختار زمانی سری‌ها و با حفظ پیوستگی داده‌ها مدیریت شدند و برای کاهش اثر ناهنجاری‌های احتمالی، مقادیر پرت نیز پیش از مدل‌سازی مورد بازبینی قرار گرفتند. همچنین، ابرپارامترهای مدل‌های Random Forest و XGBoost در مرحله آموزش و بر پایه آزمون و خطا و ارزیابی عملکرد روی داده‌های اعتبارسنجی تنظیم شدند تا ترکیب بهینه برای پیش‌بینی دبی روزانه انتخاب شود. با توجه به حجم نسبتاً محدود داده‌ها و هدف پژوهش مبنی بر حفظ تبیین‌پذیری مدل در کنار دقت پیش‌بینی، از به‌کارگیری مدل‌های عمیق‌تر مانند LSTM صرف‌نظر و از الگوریتم‌های درخت‌مبنای Random Forest و XGBoost استفاده شد.

داده‌های سنجش‌ازدور و شاخص‌های کاربری اراضی

به‌منظور بررسی تغییرات پوشش زمین و ارزیابی اثر فعالیت‌های انسانی بر رفتار هیدرولوژیکی حوضه، از داده‌های ماهواره‌ای سری زمانی Landsat 7 ETM+ و Landsat 8 OLI استفاده شد. این داده‌ها از بستر Google Earth Engine استخراج و پردازش شدند که امکان تحلیل تصاویر چندزمانه را در مقیاس حوضه‌ای فراهم می‌کند.

در این پژوهش، دو شاخص طیفی اصلی شامل شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) و شاخص تفاضل نرمال‌شده نواحی ساخته‌شده (NDBI) برای دوره زمانی ۱۳۷۹ تا ۱۴۰۲ محاسبه شدند. شاخص NDVI به‌منظور ارزیابی وضعیت و تغییرات پوشش گیاهی، و شاخص NDBI برای پایش گسترش سطوح

ساخته‌شده و توسعه شهری در محدوده حوضه به‌کار رفت. این شاخص‌ها به‌عنوان نمایه‌هایی از تحولات کاربری/پوشش اراضی، در کنار داده‌های بارش، برای تحلیل دینامیک رواناب و تبیین نقش عوامل انسانی در تغییرات پاسخ هیدرولوژیکی حوضه مورد استفاده قرار گرفتند. اگرچه داده‌های کاربری اراضی و شاخص‌های سنجش‌ازدور برای برخی مقاطع زمانی در حوضه در دسترس بودند، این داده‌ها به‌صورت سری زمانی پیوسته و همگن با وضوح زمانی متناظر با داده‌های بارش و دبی در کل دوره مطالعه موجود نبودند. ازاین‌رو، به‌منظور حفظ انسجام زمانی مدل و تفکیک روشن‌تر مؤلفه اقلیمی از اثرات غیراقلیمی، این متغیرها به‌عنوان ورودی مستقیم مدل استفاده نشدند و صرفاً برای تفسیر نتایج انتساب به‌کار رفتند.

علاوه بر داده‌های لندست و شاخص‌های استخراج‌شده از آن، از مدل رقومی ارتفاع (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر برای استخراج ویژگی‌های توپوگرافی حوضه و نیز از داده‌های مرتبط با جمعیت و توسعه انسانی، از جمله پایگاه GHSL یا منابع آماری رسمی، برای سنجش فشار انسانی و توسعه شهری استفاده شد. ترکیب این داده‌ها امکان بررسی هم‌زمان اثر ویژگی‌های طبیعی و عوامل انسانی را بر رفتار هیدرولوژیکی حوضه فراهم کرد.

خلاصه مشخصات داده‌های مورد استفاده، شامل منبع، قدرت تفکیک مکانی و زمانی، دوره آماری و کاربرد هر یک در چارچوب پژوهش، در جدول ۲) ارائه شده است. مطابق با اطلاعات این جدول، داده‌های سنجش‌ازدور، توپوگرافی و توسعه انسانی پس از انجام مراحل پیش‌پردازش، هم‌مقیاس‌سازی و هم‌زمان‌سازی با سری‌های هیدرولوژیکی، برای استخراج متغیرهای مؤثر بر تغییرات رواناب و تحلیل نقش نسبی عوامل طبیعی و انسانی در تحولات هیدرولوژیکی حوضه آبریز کن به‌کار گرفته شدند.

Table 2- Characteristics of the remote sensing, topographic, and human development data used in the study content_copy

Table 1- Data and variables used in the study

جدول ۱-داده‌ها و متغیرهای مورد استفاده در پژوهش

Category	Variable	Symbol	Time Scale	Source
Hydrology	River Discharge	Q	Daily	Hydrometric Station
Climate	Precipitation	P	Daily	Rain Gauge Station
Climate	Mean Temperature	T_{mean}	Daily	Meteorological Station
Climate	Potential Evapotranspiration	PET	Daily	Calculated
Climate	Antecedent Precipitation Index	API	Daily	Derived
Land Cover	Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	Monthly	Landsat
Urban Development	Normalized Difference Built-up Index	NDBI	Monthly	Landsat
Topography	Elevation	DEM	Constant	Digital Elevation Model

Table 2- Characteristics of the remote sensing, topographic, and human development data used in the study content_copy

جدول ۲- مشخصات داده‌های سنجش‌ازدور، توپوگرافی و توسعه انسانی مورد استفاده در پژوهش

Data / Index	Source	Spatial Resolution	Temporal Period	Application in the Study
Landsat 7/8	Google Earth Engine (GEE)	30 m	2000–2023	Extraction of land use and land cover (LULC) indices
NDVI *(Normalized Difference Vegetation Index)*	Derived from Landsat	30 m	2000–2023	Monitoring vegetation cover dynamics and variations
NDBI *(Normalized Difference Built-up Index)*	Derived from Landsat	30 m	2000–2023	Tracking urban expansion and impervious surface growth
DEM *(Digital Elevation Model)*	SRTM / ASTER	30 m	Static	Extraction of watershed topographic and morphometric features
Population / GHSL *(Global Human Settlement Layer)*	GHSL / Statistical Center of Iran	Variable	Multi-year	Quantifying anthropogenic pressure and urban development

مطابق با اطلاعات ارائه‌شده در Table 2- Characteristics of the remote sensing, topographic, and human development data used in the study content_copy

جدول ۲)، داده‌های مذکور پس از پیش‌پردازش، هم‌مقیاس‌سازی و هم‌زمان‌سازی با سری‌های هیدرولوژیکی، برای استخراج شاخص‌های مؤثر بر تغییرات رواناب و تحلیل نقش عوامل طبیعی و انسانی در رفتار هیدرولوژیکی حوضه به کار گرفته شدند.

برای ارزیابی تغییرات پوشش سطح زمین و توسعه شهری، از تصاویر چند زمانه ماهواره‌های لندست استفاده شد. به‌منظور کاهش اثر ابر و نویز زمانی، تصاویر به‌صورت ترکیب ماهانه پردازش و در مقیاس کل حوضه میانگین‌گیری شدند. روابط شاخص‌ها عبارتند از:

شاخص پوشش گیاهی:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (۱)$$

شاخص ساخت‌وساز:

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \quad (۲)$$

ساخت متغیرهای ورودی و خروجی مدل

در این پژوهش، متغیر هدف مدل، دبی روزانه رودخانه در ایستگاه سولقان در نظر گرفته شد. به‌منظور شبیه‌سازی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه به محرک‌های اقلیمی و انسانی، مجموعه‌ای از متغیرهای ورودی از داده‌های بارش روزانه، شاخص‌های سنجش‌ازدور و متغیرهای کمکی استخراج و سازمان‌دهی شد. با توجه به اینکه واکنش حوضه به بارش غالباً با تأخیر زمانی همراه است، علاوه بر بارش روز جاری، متغیرهای بارش با وقفه زمانی نیز در ساختار مدل لحاظ شدند.

متغیرهای ورودی اصلی شامل بارش روز جاری (P_t)، بارش با تأخیر زمانی یک تا چند روز ($P_{t-1}, P_{t-2}, P_{t-3}, \ldots$)، بارش تجمعی در بازه‌های کوتاه‌مدت، مانند مجموع بارش سه، پنج و هفت روزه، و شاخص بارش پیشین (API) بودند. این متغیرها برای بازنمایی حافظه هیدرولوژیکی حوضه و اثر رطوبت پیشین در فرآیند تولید رواناب به‌کار گرفته شدند. افزون بر این، شاخص‌های سنجش از دور شامل NDVI و NDBI نیز به‌عنوان نماینده تغییرات پوشش گیاهی و گسترش سطوح ساخته‌شده وارد مدل شدند تا اثرات تغییرات کاربری/پوشش اراضی و فشارهای انسانی بر رفتار رواناب لحاظ شود. همچنین، یک متغیر زمانی یا شاخص سال به‌منظور بازتاب تغییرات بلندمدت در سامانه هیدرولوژیکی در نظر گرفته شد.

در مجموع، ترکیب متغیرهای اقلیمی، تأخیری، تجمعی و سنجش‌ازدور این امکان را فراهم کرد که مدل، هم اثرات کوتاه‌مدت بارش و هم تغییرات تدریجی ناشی از تحولات محیطی و انسانی را در شبیه‌سازی دبی روزانه بازنمایی کند.

تحلیل رابطه بارش–رواناب

به‌منظور بررسی ارتباط اولیه میان بارش و پاسخ هیدرولوژیکی حوضه، رابطه بین بارش روزانه و دبی روزانه با استفاده از روش‌های تحلیل اکتشافی داده‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. در این مرحله، از نمودار پراکنش برای نمایش الگوی کلی ارتباط میان متغیرها و از شاخص‌های آماری توصیفی و همبستگی برای سنجش شدت و جهت رابطه میان بارش و رواناب استفاده شد. این تحلیل به‌عنوان گام مقدماتی، با هدف شناسایی ماهیت کلی رابطه بارش-رواناب، بررسی وجود الگوهای غیرخطی، و ارزیابی نقش احتمالی تأخیر زمانی در پاسخ حوضه انجام شد.

با توجه به اینکه پاسخ رواناب لزوماً محدود به بارش همان روز نیست، تحلیل رابطه بارش–رواناب تنها بر مبنای مقادیر هم‌زمان تفسیر نشد و نقش بارش‌های پیشین، شرایط رطوبتی قبلی حوضه و حافظه هیدرولوژیکی نیز در طراحی متغیرهای ورودی مدل لحاظ شد. از این‌رو، تحلیل اکتشافی این رابطه مبنایی برای انتخاب متغیرهای تأخیری، تجمعی و شاخص‌های رطوبتی در مرحله توسعه مدل فراهم کرد.

به‌منظور افزایش قابلیت تفسیر الگوی غالب داده‌ها، مقادیر پرت بسیار شدید که می‌توانستند ساختار اصلی پراکنش را مخدوش کنند، در مرحله ترسیم نمودارهای اکتشافی به‌صورت کنترل‌شده بررسی و در صورت لزوم از نمایش نهایی حذف شدند. این اقدام صرفاً با هدف بهبود خوانایی بصری و آشکارسازی الگوی عمومی رابطه انجام شد و در تفسیر رفتار حوضه، رخدادهای حدی به‌عنوان بخشی از پاسخ طبیعی یا متاثر از شرایط خاص حوضه مدنظر قرار گرفتند.

مدل‌های یادگیری ماشین و ارزیابی عملکرد

برای مدل‌سازی رابطه پیچیده و غیرخطی بین متغیرهای ورودی و دبی روزانه، از دو الگوریتم یادگیری ماشین شامل Random Forest (RF) و Extreme Gradient Boosting (XGBoost)) استفاده شد. این الگوریتم‌ها به‌دلیل توانایی بالا در استخراج الگوهای پیچیده و مدل‌سازی وابستگی‌های زمانی در مطالعه‌های هیدرولوژیکی به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

به‌منظور جلوگیری از نشت اطلاعات زمانی و افزایش قابلیت تعمیم نتایج، داده‌ها به‌صورت تصادفی تقسیم نشدند و از راهبرد اعتبارسنجی مبتنی بر توالی زمانی استفاده شد. در این چارچوب، داده‌های قدیمی‌تر برای آموزش مدل، داده‌های میانی برای اعتبارسنجی و تنظیم ابرپارامترها، و داده‌های جدیدتر برای آزمون نهایی در نظر گرفته شدند. بدین‌ترتیب، سری زمانی به سه بخش شامل آموزش (۱۳۷۹–۱۳۹۴)، اعتبارسنجی (۱۳۹۵–۱۳۹۸) و آزمون نهایی (۱۳۹۹–۱۴۰۲) تقسیم شد. در مرحله آموزش، ابرپارامترهای هر مدل با استفاده از نتایج دوره اعتبارسنجی و به‌صورت آزمون و خطا تنظیم شدند تا ساختار بهینه هر الگوریتم تعیین شود. سپس، عملکرد مدل‌ها در دوره اعتبارسنجی و آزمون با استفاده از شاخص‌های آماری شامل ضریب تعیین(R^2) ، ریشه

میانگین مربعات خطا(RMSE) ، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و ضریب کارایی نش–ساتکلیف (NSE) ارزیابی شد. بنابراین، بازه ۱۳۹۵–۱۳۹۸ یک شکاف حذف‌شده در داده‌ها نبوده، بلکه به‌عنوان دوره اعتبارسنجی برای کنترل بیش‌برازش و بهبود تعمیم‌پذیری مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

تفسیرپذیری مدل با استفاده از SHAP

به‌منظور تبیین سهم متغیرهای ورودی در پیش‌بینی دبی روزانه، از روش SHAP (SHapley Additive exPlanations) استفاده شد. این روش بر پایه نظریه بازی‌های مشارکتی توسعه یافته و امکان تعیین سهم هر متغیر در خروجی مدل را فراهم می‌کند. همچنین پس از آموزش مدل، از روش SHAP برای تحلیل سهم نسبی متغیرها و تفسیر رفتار مدل استفاده شد.

در این چارچوب، مقادیر SHAP برای متغیرهای ورودی شامل بارش جاری، بارش‌های تأخیری، شاخص بارش پیشین، NDVI، NDBI و متغیر زمانی محاسبه شد. نمودارهای خلاصه و وابستگی SHAP برای بررسی اهمیت نسبی متغیرها و الگوهای غیرخطی در پاسخ هیدرولوژیکی حوضه مورد استفاده قرار گرفتند.

چارچوب برآورد سهم نسبی عوامل اقلیمی و انسانی در تغییرات رواناب

به‌منظور تفکیک و کمی‌سازی سهم تغییرات اقلیمی و عوامل انسانی، به‌ویژه توسعه شهری، در تغییرات رابطه بارش–رواناب حوضه کن، از یک چارچوب تفکیک مبتنی بر مدل استفاده شد. مبنای این رویکرد آن است که پاسخ هیدرولوژیکی حوضه در طول زمان تحت تأثیر دو دسته عامل اصلی قرار می‌گیرد:

۱- تغییرات در ورودی‌های اقلیمی، به‌ویژه بارش، و

۲- تغییرات در ویژگی‌های فیزیکی سطح حوضه، از جمله گسترش نواحی شهری و افزایش سطوح نفوذناپذیر.

در گام نخست، دوره آماری به دو زیردوره شامل دوره پایه و دوره تغییریافته تقسیم شد. دوره پایه نمایانگر شرایطی است که در آن رابطه بارش–رواناب عمدتاً تحت تأثیر ویژگی‌های طبیعی حوضه قرار دارد و مداخله انسانی، به‌ویژه توسعه شهری، در آن کمتر بوده است. در مقابل، دوره تغییریافته بیانگر بازه‌ای است که طی آن تغییرات کاربری اراضی، گسترش ساخت‌وساز و افزایش سطوح نفوذناپذیر می‌توانسته‌اند رفتار هیدرولوژیکی حوضه را دستخوش تغییر کنند. مرز بین این دو دوره بر اساس آزمون‌های آماری تشخیص روند و نقطه شکست، از جمله آزمون من–کندال و آزمون پتیت، تعیین شد.

در گام دوم، مدل منتخب یادگیری ماشین با استفاده از داده‌های دوره پایه آموزش داده شد تا رابطه بارش–رواناب تحت شرایط مرجع یا شبه‌طبیعی حوضه بازنمایی شود. سپس این مدلِ آموزش‌دیده با استفاده از ورودی‌های اقلیمی دوره تغییریافته اجرا شد تا دبی متناظر با شرایط اقلیمی جدید، اما تحت فرض ثابت ماندن ویژگی‌های حوضه، شبیه‌سازی شود. این شبیه‌سازی به‌عنوان سناریوی متقابل (counterfactual) در نظر گرفته شد. سناریوهای درنظر گرفته شده عبارتند از: شرایط مرجع و شرایط اقلیمی تغییر یافته.

این چارچوب بر سه فرض استوار است:

۱- رابطه اقلیم–رواناب آموخته‌شده در دوره پایه نماینده شرایط مرجع حوضه است؛

۲- مدل یادگیری ماشین قادر به بازنمایی ساختار غالب پاسخ هیدرولوژیکی است؛

۳- اختلاف بین شبیه‌سازی و مشاهدات در دوره تغییریافته می‌تواند به‌عنوان شاخصی از تغییرات غیر اقلیمی تفسیر شود.

بر این اساس، تغییر کل رواناب و اجزای منتسب به اقلیم و فعالیت‌های انسانی به‌صورت روابط (۳) تا (۵) تعریف شدند:

$$\Delta Q_{total} = \bar{Q}_{obs,alt} - \bar{Q}_{base} \qquad (۳)$$

$$\Delta Q_{climate} = \bar{Q}_{sim,alt} - \bar{Q}_{base} \qquad (۴)$$

$$\Delta Q_{non-climate} = \bar{Q}_{obs,alt} - \bar{Q}_{sim,alt} \qquad (۵)$$

که در آن،

$\bar{Q}_{base}$ میانگین دبی مشاهده‌شده در دوره پایه،

$\bar{Q}_{obs,alt}$ میانگین دبی مشاهده‌شده در دوره تغییریافته، و

$\bar{Q}_{sim,alt}$ میانگین دبی شبیه‌سازی‌شده برای دوره تغییریافته با استفاده از مدل آموزش‌دیده در دوره پایه است.

در این چارچوب، $\Delta Q_{climate}$ بیانگر بخشی از تغییرات رواناب است که تنها با تغییر در شرایط اقلیمی قابل توضیح است، زیرا ساختار و ویژگی‌های حوضه در مدل ثابت فرض می‌شود. در مقابل، $\Delta Q_{non-climate}$ به‌عنوان جزء باقیمانده‌ای تفسیر می‌شود که می‌تواند ناشی از تغییرات انسانی، از جمله توسعه شهری، تغییر کاربری اراضی و سایر عوامل مدل‌نشده باشد.

برای مقایسه نسبی سهم هر مؤلفه، درصد مشارکت عوامل اقلیمی و انسانی نیز از روابط (۶) و (۷) محاسبه شد:

$$C_{climate} = \frac{\Delta Q_{climate}}{\Delta Q_{total}} \times 100 \qquad (۶)$$

$$C_{non-climate} = \frac{\Delta Q_{non-climate}}{\Delta Q_{total}} \times 100 \qquad (۷)$$

این چارچوب امکان آن را فراهم می‌کند که سهم تغییرات بارش از سهم تغییرات سطح حوضه در دگرگونی پاسخ بارش–رواناب به‌صورت کمی تفکیک شود و در نتیجه، نقش نسبی اقلیم و توسعه شهری در تحول رفتار هیدرولوژیکی حوضه کن با دقت بیشتری تفسیر گردد. لازم به ذکر است که این چارچوب یک رویکرد انتساب مبتنی بر مدل بوده و نتایج آن نباید به‌عنوان اثبات مستقیم روابط علّی بین توسعه شهری و تغییرات رواناب تفسیر شود.

نتایج و بحث

به‌منظور درک جامع از نحوه پیاده‌سازی گام‌های مختلف پژوهش و ارتباط میان بخش‌های پیش‌پردازش، مدل‌سازی و فرآیند تبیین هیدرولوژیکی، ساختار کلی و مراحل اجرایی تحقیق در قالب

Fig. 2- Flowchart of the research methodology and analytical framework.

فلوچارت شکل ۲) ارائه شده است. در ادامه‌ی این بخش، نتایج حاصل از هر یک از این گام‌ها به‌تفصیل تشریح و تحلیل می‌شود.

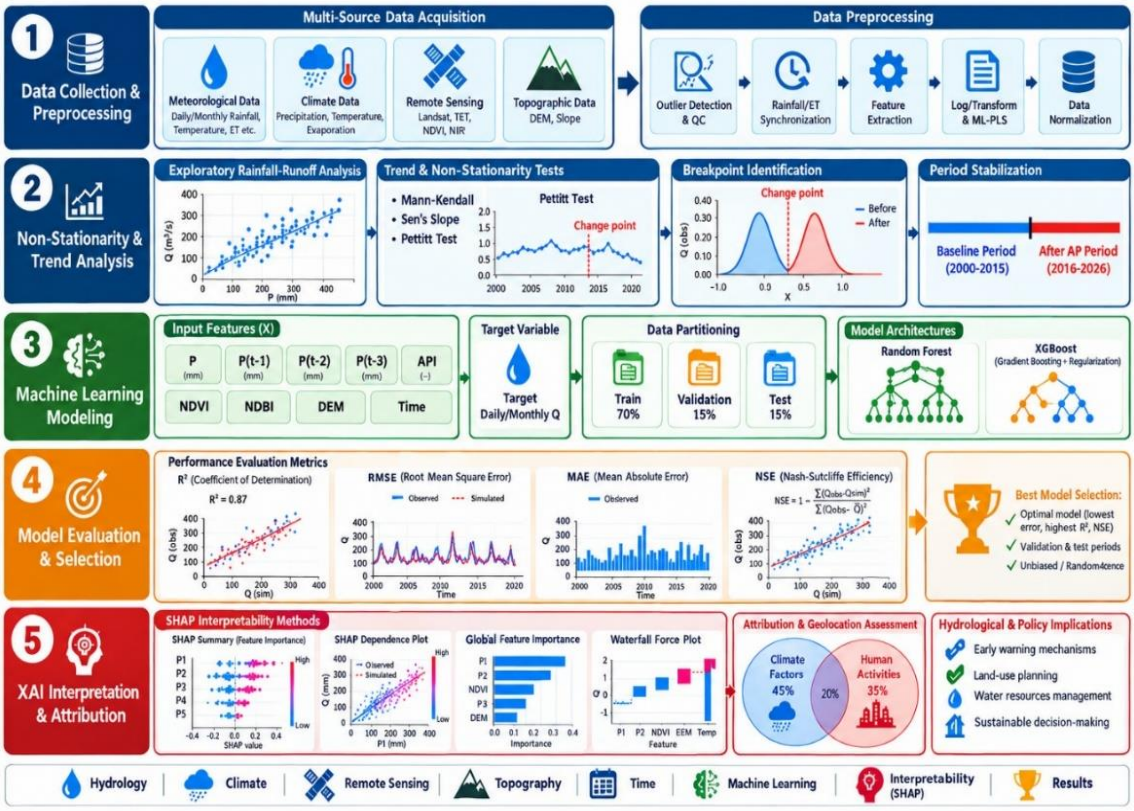


Fig. 2- Flowchart of the research methodology and analytical framework.

شکل ۲- فلوچارت مراحل اجرایی و ساختار تحلیل‌های پژوهش حاضر

ویژگی‌های هیدرو-اقلیمی و تغییرات کاربری اراضی حوضه کن

به‌منظور شناخت اولیه رفتار هیدرو—اقلیمی حوضه کن، آمار توصیفی سری‌های روزانه بارش در ایستگاه سنگان و دبی در ایستگاه سولقان برای دوره مشترک ۱۳۷۹ تا ۱۴۰۲ محاسبه شد که خلاصه آن در جدول ۳) ارائه شده است. استفاده از دوره زمانی مشترک، امکان مقایسه مستقیم تغییرپذیری دو مؤلفه اصلی سامانه بارش—رواناب را فراهم می‌کند.

نتایج نشان داد که هر دو متغیر از تغییرپذیری زمانی قابل‌توجهی برخوردارند. میانگین بارش روزانه در ایستگاه سنگان برابر با ۷/۷۶ میلی‌متر و میانگین دبی روزانه در ایستگاه سولقان برابر با ۲/۲۱ مترمکعب بر ثانیه است. مقادیر حداکثر ثبت‌شده به‌ترتیب به ۷۲/۰ میلی‌متر برای بارش و ۵۸/۷ مترمکعب بر ثانیه برای دبی می‌رسد. مقادیر نسبتاً بالای انحراف معیار (۸/۸۰ میلی‌متر برای بارش و ۳/۵۴ مترمکعب بر ثانیه برای دبی) و همچنین ضرایب تغییرات بزرگ‌تر از یک (۱/۱۳ برای بارش و ۱/۶۰ برای دبی) بیانگر نوسان‌پذیری چشمگیر در رژیم اقلیمی و هیدرولوژیکی حوضه است.

فاصله قابل‌توجه میان مقادیر مرکزی و بیشینه، به‌ویژه در مورد دبی، حاکی از نقش برجسته رخدادهای حدی در شکل‌دهی رفتار هیدرولوژیکی حوضه است. کمتر بودن میانه دبی (۰/۸۸ مترمکعب بر ثانیه) نسبت به میانگین آن نیز نشان‌دهنده چولگی مثبت توزیع جریان و سهم بالای رخدادهای با دبی زیاد در افزایش مقدار میانگین است.

بررسی سری زمانی روزانه نشان می‌دهد که حوضه در بخش عمده‌ای از سال دارای جریان پایه نسبتاً پایین است و افزایش‌های محسوس دبی عمدتاً در پاسخ به بارش‌های سنگین و در برخی دوره‌ها ذوب برف فصلی رخ می‌دهد. این الگو بیانگر ماهیت نسبتاً تندپاسخ حوضه کن است؛ به‌گونه‌ای که ویژگی‌های فیزیوگرافی آن، از جمله شیب قابل‌ملاحظه، زمان تمرکز کوتاه و شرایط سطحی،

زمینه را برای تقویت پاسخ رواناب در برابر ورودی‌های جوی فراهم می‌کند.

افزون بر این، تحلیل شاخص‌های سنجش از دور مرتبط با پوشش و کاربری اراضی نشان می‌دهد که بخش‌های پایین‌دست حوضه طی دوره مطالعه تحت تأثیر گسترش سطوح ساخته‌شده و افزایش سطوح نفوذناپذیر قرار گرفته‌اند. چنین تغییراتی می‌تواند با کاهش نفوذ و افزایش رواناب سطحی، در تشدید پاسخ‌های سیلابی نقش داشته باشد. بااین‌حال، تعیین سهم نسبی عوامل اقلیمی و انسانی نیازمند تحلیل‌های مدل‌محور و کمی‌سازی دقیق‌تر است که در بخش‌های بعدی ارائه خواهد شد.

در مجموع، نتایج این بخش نشان می‌دهد که حوضه کن از نظر هیدرولوژیکی دارای رفتاری متغیر و حساس به رخدادهای شدید اقلیمی است؛ رفتاری که احتمالاً حاصل برهم‌کنش هم‌زمان تغییرپذیری اقلیمی و تحولات کاربری اراضی در طول زمان است.

تحلیل روند سری‌های زمانی و شناسایی نقاط شکست

به‌منظور شناسایی تغییرات بلندمدت هیدرواقلیمی در حوضه کن، آزمون ناپارامتریک من–کندال (Mann-Kendall) برای ارزیابی معناداری روند و تخمین‌گر شیب سن (Sen’s Slope) برای تعیین نرخ تغییرات سالانه و فصلی به‌کار گرفته شد. نتایج محاسبات در

جدول ۴–نتایج تحلیل روند (Mann-Kendall) و نقطه شکست (Pettitt) در حوضه کن

Table 4- Results of trend analysis (Mann–Kendall) and change-point detection (Pettitt) in the Kan watershed

) ارائه شده است.

جدول ۳–آمار توصیفی بارش روزانه ایستگاه سنگان و دبی روزانه ایستگاه سولقان در دوره مورد مطالعه

Table 3-Descriptive statistics of daily precipitation at Sangan station and daily discharge at Solqan station during the study period

Statistical Metric	Precipitation (Sangan) [mm]	Discharge (Soleqan) [m3/s]
Mean	7.76	2.21
Median	4.50	0.88
Standard Deviation (Std. Dev.)	8.80	3.54
Minimum	0.10	0.00
Maximum	72.00	58.70
Coefficient of Variation (CV)	1.13	1.60

جدول ٤–نتایج تحلیل روند (Mann-Kendall) و نقطه شکست (Pettitt) در حوضه کن

Table 4- Results of trend analysis (Mann–Kendall) and change-point detection (Pettitt) in the Kan watershed

Variable	Time Scale	Z-score	P-value	Sen’s Slope	Breakpoint Year
Precipitation	Annual	2.324	0.020	5.500	2009 (1388)
Discharge	Annual	-1.176	0.240	-0.011	1996 (1375)
Precipitation	Spring	1.321	0.187	3.389	2015 (1394)
Discharge	Spring	-1.712	0.087	-0.038	1996 (1375)
Precipitation	Winter	2.641	0.008	5.588	2016 (1395)
Discharge	Winter	1.128	0.259	0.012	1982 (1361)

Note: Positive Z-values indicate an increasing trend, while negative Z-values denote a decreasing trend. Values are considered statistically significant at the 95% confidence level ($p<0.05$).

تحلیل‌ها نشان می‌دهد که بارش سالانه در ایستگاه سنگان دارای روند افزایشی معنادار ($Z=2.324, p<0.05$) با نرخ افزایش ۵/۵ میلی‌متر در سال است. بررسی فصلی بارش نیز نشان‌دهنده روند افزایشی معنادار در فصل زمستان ($Z=2.641$) است. در مقابل، سری زمانی دبی در ایستگاه سولقان روند نزولی تدریجی را نشان می‌دهد، اگرچه این روند در مقیاس سالانه از لحاظ آماری معنادار نیست ($p>0.05$). این ناهمسویی می‌تواند نشان‌دهنده حضور عوامل فراتر از تغییرات بارش باشد؛ از جمله تغییر در شرایط سطح حوضه، تبخیر–تعرق، برداشت آب و سایر فرآیندهای غیراقلیمی.

علاوه بر تحلیل روند، برای شناسایی گسست‌های ساختاری در سری‌های زمانی، از آزمون Pettitt استفاده شد. نقطه شکست معنادار در سری بارش سالانه در سال ۱۳۸۸ ($p=0.021$) شناسایی شد که نشان‌دهنده تغییر در الگوی بارش حوضه در اواخر دهه ۸۰ خورشیدی است. نتایج حاصل از این تحلیل، مبنای اصلی برای تفکیک اثرات اقلیمی از مداخلات انسانی در پاسخ‌های هیدرولوژیکی حوضه در بخش‌های آتی خواهد بود.

به‌منظور ارائه یک تصویر روشن از رفتار زمانی متغیرهای هیدرو–اقلیمی در حوضه کن، سری زمانی روزانه بارش ایستگاه سنگان و دبی ایستگاه سولقان برای دوره ۱۳۷۹–۱۴۰۲ ترسیم شد

)

Fig. 3- Annual time series of precipitation at Sangan station and discharge at Solqan station (2000–2023). Blue bars represent precipitation

(left axis) and the red curve represents discharge (right axis).

شکل ۳). در این شکل‌ها، علاوه بر مقادیر روزانه، میانگین متحرک ۳۶۵ روزه نیز به‌منظور نمایش روند کلی تغییرات و کاهش نوسانات کوتاه‌مدت ارائه شده است. همچنین، محل نقطه شکست شناسایی‌شده توسط آزمون Pettitt به‌صورت خط‌چین عمودی مشخص شده تا امکان تفسیر بصری تغییر رژیم زمانی در هر یک از سری‌ها فراهم شود. اگرچه هم‌زمانی نقطه شکست شناسایی‌شده با دوره تشدید توسعه شهری می‌تواند مؤید نقش تغییرات کاربری اراضی باشد، این هم‌زمانی به‌تنهایی بیانگر رابطه علّی قطعی نیست. بنابراین، نتایج این پژوهش باید به‌عنوان شواهدی از نقش محتمل عوامل غیراقلیمی ـ از جمله توسعه شهری، تغییرات مدیریت آب و سایر مداخلات انسانی ـ در تغییر رابطه بارش–رواناب تفسیر شوند، نه اثبات مستقیم سهم یک عامل منفرد.

تحلیل توأم سری‌های زمانی بارش و دبی

Fig. 3- Annual time series of precipitation at Sangan station and discharge at Solqan station (2000–2023). Blue bars represent precipitation (left axis) and the red curve represents discharge (right axis).

شکل ۳) نشان‌دهنده یک گسست رفتاری میان این دو متغیر هیدرولوژیک در حوضه کن است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بارش در ایستگاه سنگان به‌ویژه در دهه اخیر، یک رفتار افزایشی آشکار با نوسانات شدید در مقادیر حدی را تجربه کرده است. نتایج آزمون من–کندال نیز با مقدار Z=2.324 و سطح معناداری p=0.020، این روند صعودی معنادار را در سطح اطمینان ۹۵ درصد تأیید می‌کند. همچنین مثبت بودن شیب سن (۵/۵۰) حاکی از تشدید ورودی‌های جوی به حوضه است.

با این حال، در سمت خروجی حوضه، دبی ایستگاه سولقان نه تنها با این روند افزایشی همراهی نکرده، بلکه واگرایی محسوسی را نشان می‌دهد. علیرغم افزایش بارش، دبی سالانه روندی کاهشی (Z=-1.176) را تجربه کرده است که هرچند از نظر آماری نامعنادار (p=0.240) تلقی می‌شود، اما نشان‌دهنده تغییر در پاسخ هیدرولوژیک حوضه است. این تضاد بین افزایش ورودی (بارش) و کاهش یا ثبات خروجی (دبی)، فرضیه تغییر رابطه بارش–رواناب تحت تأثیر عوامل غیراقلیمی نظیر توسعه فعالیت‌های انسانی، تغییر کاربری اراضی یا افزایش انتزاع آب در بالادست را تقویت می‌کند که در بخش‌های آتی با استفاده از رویکرد هوش مصنوعی تبیین‌پذیر مورد واکاوی قرار می‌گیرد.

.

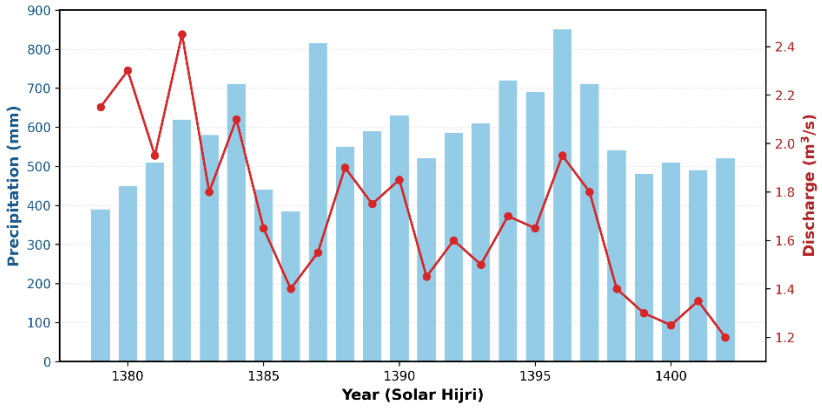


Fig. 3- Annual time series of precipitation at Sangan station and discharge at Solqan station (2000–2023). Blue bars represent precipitation (left axis) and the red curve represents discharge (right axis).

شکل ۳- سری زمانی تغییرات سالانه بارش ایستگاه سنگان و دبی خروجی ایستگاه سولقان (۱۳۷۹-۱۴۰۲)؛ ستون‌های آبی نشان‌دهنده بارش (محور چپ) و منحنی قرمز نشان‌دهنده دبی (محور راست) است.

تغییر رابطه بارش–رواناب و تحلیل حساسیت

به‌منظور ارزیابی تغییرات پاسخ هیدرولوژیکی حوضه به ورودی‌های اقلیمی، رابطه بین بارش و رواناب در بازه‌های زمانی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، ضریب همبستگی و روابط رگرسیونی بین بارش تجمعی و دبی متناظر محاسبه شد تا هرگونه تغییر در شدت و جهت وابستگی میان این دو متغیر شناسایی شود. تغییر در ضرایب این روابط بیانگر تحول در کارایی تولید رواناب و تغییر در حساسیت(Runoff Coefficient) هیدرولوژیکی حوضه نسبت به ورودی بارش است.

برای درک عمیق‌تر از تغییرات رفتار حوضه کن، کل دوره آماری بر اساس نقطه شکست شناسایی شده در بخش قبلی (سال ۱۳۸۸) به دو زیردوره تقسیم گردید. هدف از این تفکیک، شناسایی انحراف

در رابطه سنتی بارش–رواناب و سنجش میزان پاسخ‌دهی دبی خروجی به نوسانات بارش است. شاخص‌های آماری و ضرایب هیدرولوژیکی استخراج شده برای هر دو دوره در **Error! Reference source not found.** ارائه شده است.

افزون بر این، ضریب رواناب(Runoff Coefficient) نیز به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی پاسخ حوضه تحلیل شد. تغییرات این شاخص در طول زمان می‌تواند منعکس‌کننده تغییر در نسبت بارش مؤثر تبدیل‌شده به رواناب باشد. در صورت مشاهده روند افزایشی در ضریب رواناب، می‌توان آن را به افزایش سهم رواناب سطحی و کاهش ظرفیت نفوذ و ذخیره‌سازی حوضه نسبت داد؛ وضعیتی که ممکن است تحت تأثیر توسعه شهری، گسترش سطوح نفوذناپذیر، تغییر کاربری اراضی، یا سایر مداخلات انسانی و محیطی قرار گرفته باشد.

تحلیل نتایج **Error! Reference source not found.** و **Error! Reference source not found.** نشان‌دهنده یک گسست رفتاری (Behavioral Shift) در هیدرولوژی حوضه است. در حالی که میانگین بارش سالانه در زیردوره دوم با افزایشی معادل ۱۶/۲ درصد مواجه شده، دبی خروجی به‌طور متناقضی ۵/۷ درصد کاهش یافته است. این تضاد منجر به تضعیف رابطه آماری بارش–رواناب شده است؛ به‌طوری که ضریب تعیین (R^2) از ۰/۵۵ در دوره اول به ۰/۳۵ در دوره دوم سقوط کرده است.

کاهش ضریب رواناب متوسط از ۰/۳۵ به ۰/۲۸، بیانگر افت کارایی هیدرولوژیکی حوضه در تبدیل بارش به رواناب است. این پدیده که تحت عنوان ناهمبستگی حساسیت هیدرولوژیکی (Hydrological Sensitivity Decoupling) شناخته می‌شود، نشان می‌دهد که بخش بزرگی از افزایش بارش‌ها در دهه اخیر، به‌دلیل عواملی نظیر افزایش تبخیر–تعرق ناشی از گرمایش جهانی، گسترش پوشش گیاهی یا برداشت‌های غیرمجاز در بالادست، به خروجی حوضه نرسیده است. این یافته برای برنامه‌ریزی منابع آب حیاتی است، زیرا اثبات می‌کند که در شرایط فعلی، افزایش بارش لزوماً به معنای بهبود وضعیت آب‌های سطحی در دسترس نخواهد بود. تغییر رابطه بارش–رواناب و تحلیل حساسیت

به‌منظور ارزیابی تغییرات پاسخ هیدرولوژیکی حوضه به ورودی‌های اقلیمی، رابطه بین بارش و رواناب در بازه‌های زمانی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، ضریب همبستگی و روابط رگرسیونی بین بارش تجمعی و دبی متناظر محاسبه شد تا هرگونه تغییر در شدت و جهت وابستگی میان این دو متغیر شناسایی شود. تغییر در ضرایب این روابط بیانگر تحول در کارایی تولید رواناب و تغییر در حساسیت(Runoff Coefficient) هیدرولوژیکی حوضه نسبت به ورودی بارش است.

برای درک عمیق‌تر از تغییرات رفتار حوضه کن، کل دوره آماری بر اساس نقطه شکست شناسایی شده در بخش قبلی (سال ۱۳۸۸) به دو زیردوره تقسیم گردید. هدف از این تفکیک، شناسایی انحراف در رابطه سنتی بارش–رواناب و سنجش میزان پاسخ‌دهی دبی خروجی به نوسانات بارش است. شاخص‌های آماری و ضرایب هیدرولوژیکی استخراج شده برای هر دو دوره در **Error! Reference source not found.** ارائه شده است.

Table 5- Comparison of statistical indices and rainfall–runoff sensitivity in the sub periods before and after the change point year(۲۰۰۹)

جدول ۵- مقایسه شاخص‌های آماری و حساسیت بارش-رواناب در زیردوره‌های قبل و بعد از نقطه شکست (۱۳۸۸)

Metric	Unit	Full Period (2000–2023)	First Sub-period (2000–2008)	Second Sub-period (2009–2023)	Change (%)
Mean Annual Precipitation	mm	600.5	54.52	633.7	+16.2
Mean Annual Discharge	m^3/s	1.85	1.92	1.81	-5.70
Correlation Coefficient ®	-	0.68	0.74	0.59	-20.20
Coefficient of Determination (R^2)	-	0.46	0.55	0.35	-36.30
Mean Runoff Coefficient	-	0.31	0.35	0.28	-20.00

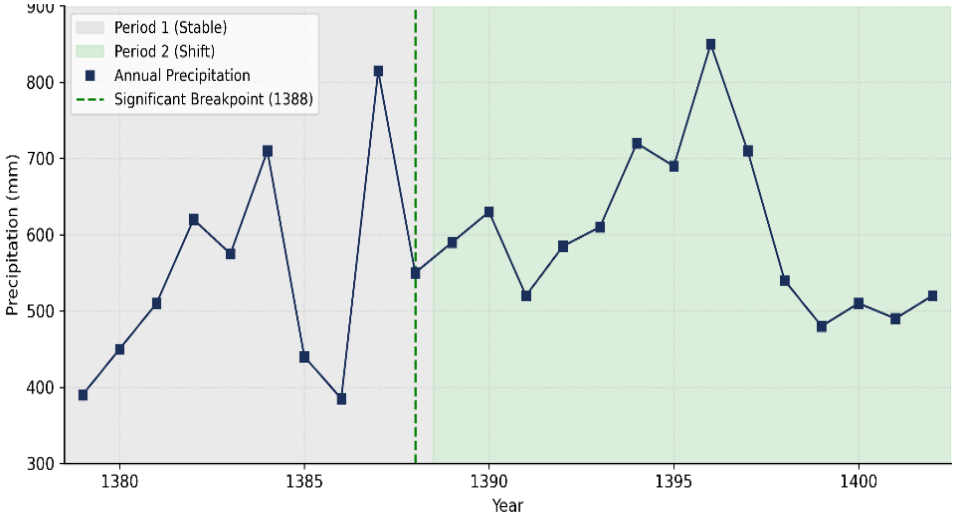


Fig. 4- Breakpoint analysis of the annual precipitation time series using the Pettitt test. The green dashed line marks the hydrological change-point year (2009), and the shaded regions indicate the two distinct sub-periods.

شکل ٤- تحلیل نقطه شکست (Breakpoint) در سری زمانی بارش سالانه با استفاده از آزمون Pettitt؛ خط‌چین سبز نشان‌دهنده سال تغییر رفتار هیدرولوژیکی (۱۳۸۸) و نواحی سایه‌دار نشان‌دهنده دو زیردوره متمایز است.

توسعه و اعتبارسنجی مدل‌های یادگیری ماشین

در این پژوهش، رابطه بارش–رواناب در دوره روزانه ۱۳۷۹–۱۴۰۲ با استفاده از رویکردهای یادگیری ماشین و هوش مصنوعی تبیین‌پذیر مدل‌سازی شد. داده‌های ورودی شامل سری‌های روزانه بارش ایستگاه سنگان و دبی ایستگاه سولقان بودند و متغیر هدف، دبی روزانه حوضه در نظر گرفته شد. با توجه به ماهیت غیرخطی و وابسته به حافظه سامانه هیدرولوژیکی، از مدل‌های Random Forest و XGBoost برای بازسازی رفتار رواناب استفاده شد.

پیش از مدل‌سازی، داده‌ها از نظر پیوستگی زمانی و کیفیت کنترل شدند و برای آموزش و ارزیابی مدل‌ها به مجموعه‌های آموزشی و آزمون تفکیک شدند. عملکرد مدل‌ها با شاخص‌های متداول دقت، از جمله RMSE، MAE و ضریب تعیین (R^2) سنجیده شد. برای تفسیر نقش متغیرهای اقلیمی و شهری، از روش SHAP استفاده شد تا سهم نسبی هر متغیر در پیش‌بینی دبی و جهت اثرگذاری آن‌ها مشخص شود. در این چارچوب، متغیرهایی مانند بارش و شاخص‌های شهرنشینی، از جمله NDBI، برای تحلیل اهمیت و وابستگی به‌کار رفتند.

ترکیب مدل‌های یادگیری ماشین با SHAP امکان فراهم‌کردن هم‌زمان دقت پیش‌بینی و تبیین‌پذیری را ایجاد کرد؛ به‌گونه‌ای که علاوه بر شبیه‌سازی رابطه بارش–رواناب، سهم نسبی عوامل اقلیمی و انسانی در تغییرات جریان نیز قابل استخراج شد.

برای ارزیابی توان پیش‌بینی مدل‌های توسعه‌یافته، داده‌های سری زمانی با حفظ ترتیب زمانی به دو بخش آموزش و آزمون تفکیک شدند تا از نشت اطلاعات از آینده به گذشته جلوگیری شود.

این رویکرد، با توجه به ماهیت وابسته به زمان متغیرهای بارش و دبی، مبنای مناسبی برای سنجش واقع‌بینانه عملکرد مدل‌ها فراهم می‌کند. عملکرد مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های متداول ارزیابی مدل‌های هیدرولوژیکی سنجیده شد، از جمله:

ضریب نش–ساتکلیف

ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)

ضریب تعیین (R^2)

میانگین خطای مطلق (MAE)

این شاخص‌ها امکان مقایسه دقت مدل‌ها در بازتولید الگوی زمانی دبی را فراهم می‌کنند. به‌منظور ارزیابی توان مدل‌های یادگیری ماشین در شبیه‌سازی دبی روزانه، دو الگوریتم Random Forest و XGBoost با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه سنگان و دبی ایستگاه سولقان در دوره ۱۳۷۹ تا ۱۴۰۲ توسعه و مقایسه شدند. به‌منظور مقایسه شفاف عملکرد مدل‌های به‌کاررفته، نتایج ارزیابی و اهمیت متغیرها در جدول ۶ ارائه شده است. بر اساس نتایج جدول ۶، مدل Random Forest نسبت به XGBoost عملکرد بهتری نشان داد (R^2=0.616 و NSE=0.616). اگرچه عملکرد مدل در سطح قابل قبول ارزیابی شد، مقدار R^2=0.616 نشان می‌دهد که بخشی از تغییرپذیری دبی هنوز توسط متغیرهای ورودی توضیح داده نشده است و احتمال وجود عوامل مؤثر دیگر همچنان مطرح است که در بخش محدودیتهای مقاله تشریح شده است. بنابراین، نتایج این مدل باید بیشتر در چارچوب تحلیل تفسیری و انتساب نسبی عوامل اثرگذار و نه به‌عنوان ابزاری با دقت کافی برای پیش‌بینی عملیاتی تفسیر شوند.

جدول ٦- مقایسه عملکرد مدل‌های Random Forest و XGBoost در شبیه‌سازی دبی روزانه

Table 6- Performance comparison of Random Forest and XGBoost models in daily discharge simulation

MAE	RMSE	NSE	R^2	Model
1.397	3.062	0.616	0.616	Random Forest
1.501	3.279	0.560	0.560	XGBoost

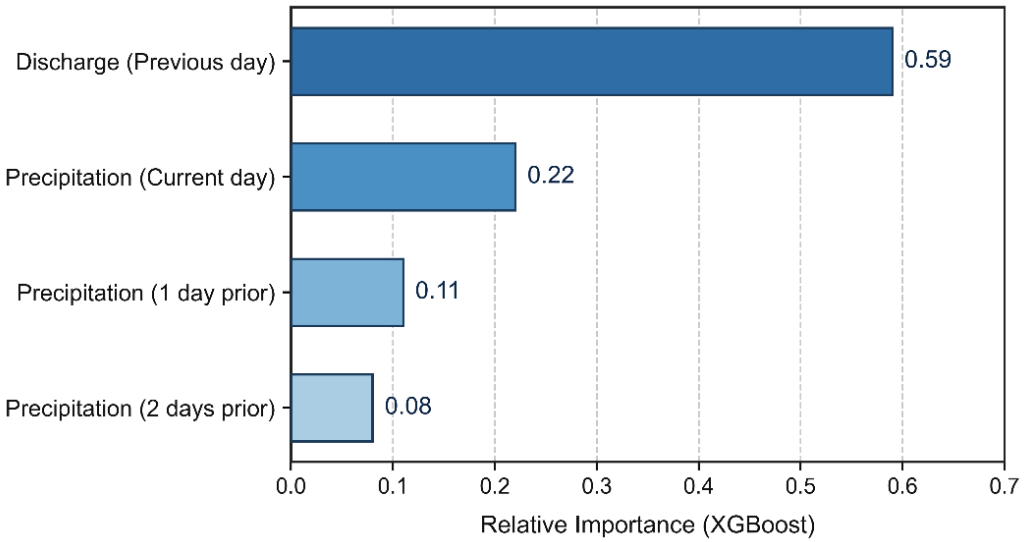


Fig. 5- Importance ranking of input variables in the XGBoost model based on the relative importance index.

شکل ٥- رتبه‌بندی اهمیت متغیرهای ورودی در مدل XGBoost بر اساس شاخص اهمیت نسبی.

تحلیل اهمیت متغیرها در بازسازی دبی

به‌منظور درک بهتر ساختار تصمیم‌گیری مدل و شناسایی نقش هر یک از متغیرهای ورودی در پیش‌بینی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه، تحلیل اهمیت متغیرها (Feature Importance) برای مدل منتخب XGBoost انجام شد (**Error! Reference source not found.**). این تحلیل نشان می‌دهد که هر متغیر تا چه اندازه در کاهش خطا و بهبود دقت مدل در مرحله آموزش نقش داشته است.

نتایج نشان داد که دبی روز قبل (discharge_lag1) با اختلاف زیاد، تعیین‌کننده‌ترین متغیر در پیش‌بینی دبی روزانه است. این یافته بیانگر پایداری (Persistence) بالای جریان و نقش کلیدی حافظه هیدرولوژیکی در حوضه مورد مطالعه است. پس از آن، بارش جاری (Precipitation) دومین متغیر مهم شناخته شد که نشان‌دهنده پاسخ سریع حوضه به ورودی‌های جوی است.

متغیرهای وقفه‌دار بارش نیز سهم معناداری در مدل نشان دادند. تأثیرگذاری این متغیرها تأیید می‌کند که فرآیند تبدیل بارش به رواناب در این حوضه دارای تأخیر زمانی است که می‌تواند ناشی از ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی، زمان تمرکز حوضه و فرآیندهای ذخیره و رهاسازی در مخازن سطحی و زیرسطحی باشد. به‌طور کلی، ترکیب متغیرهای حالت فعلی و متغیرهای وقفه‌دار، مدل را قادر ساخته است تا پیچیدگی‌های زمانی رفتار هیدرولوژیکی را به‌خوبی بازنمایی کند.

نتایج نشان داد که بارش جاری و متغیرهای وقفه‌دار بارش و دبی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در پیش‌بینی دبی روزانه هستند. در میان متغیرهای مورد بررسی، متغیرهای دارای حافظه زمانی، به‌ویژه دبی روز قبل و بارش‌های وقفه‌دار، سهم قابل توجهی در ساختار تصمیم‌گیری مدل نشان دادند. این موضوع بیانگر وجود حافظه هیدرولوژیکی در سامانه حوضه است؛ به‌طوری‌که پاسخ رواناب تنها به شرایط بارش همان روز وابسته نبوده و وضعیت پیشین سامانه هیدرولوژیکی نیز نقش مهمی در شکل‌گیری دبی ایفا می‌کند.

چنین الگویی با رفتار هیدرولوژیکی بسیاری از حوضه‌های کوهستانی سازگار است، زیرا فرآیندهایی نظیر ذخیره رطوبت خاک، تأخیر در انتقال رواناب و نقش مخازن سطحی و زیرسطحی می‌توانند موجب ایجاد وابستگی زمانی در پاسخ جریان شوند. بنابراین، استفاده از متغیرهای وقفه‌دار در مدل‌های یادگیری ماشین می‌تواند به‌طور قابل توجهی توانایی مدل در بازنمایی پویایی‌های زمانی سامانه بارش–رواناب را بهبود دهد. لازم به ذکر است که مقادیر SHAP در این پژوهش صرفاً به‌عنوان شاخصی برای تفسیر ساختار مدل مورد استفاده قرار گرفته‌اند و از تفسیر مستقیم آن‌ها به‌عنوان روابط علّی میان متغیرها و فرآیندهای فیزیکی اجتناب شده است.

چارچوب انتساب سهم نسبی عوامل اقلیمی و غیراقلیمی

به‌منظور ارزیابی سهم نسبی تغییرات اقلیمی و عوامل غیراقلیمی در تحول رفتار رواناب، از چارچوب انتساب مبتنی بر مدل استفاده شد. در این چارچوب، مدل یادگیری ماشین توسعه‌یافته در دوره پایه به‌عنوان نمایشگر شرایط مرجع حوضه در نظر گرفته شد و سپس با استفاده از داده‌های اقلیمی دوره تغییریافته اجرا شد.

هدف از این تحلیل، ایجاد یک سناریوی متقابل (Counterfactual Scenario) بود که در آن تنها شرایط اقلیمی تغییر می‌کند و سایر ویژگی‌های حوضه به‌صورت ضمنی ثابت فرض می‌شوند.

نتایج نشان داد بخشی از تغییرات مشاهده شده در رواناب توسط تغییر در ورودی‌های اقلیمی قابل بازتولید است؛ با این حال اختلاف بین دبی مشاهده شده و دبی شبیه‌سازی شده نشان داد که تنها تغییرات اقلیمی برای توضیح کامل رفتار جدید حوضه کافی نیست. از آنجا که متغیرهای مستقیم مربوط به توسعه شهری، از جمله درصد سطوح نفوذناپذیر، در دسترس نبودند، انتساب اثرات انسانی در این پژوهش به‌صورت مستقیم و علّی انجام نشد. در عوض، با استفاده از چارچوب سناریوی متقابل، مدل آموزش‌دیده در دوره پایه به‌عنوان نماینده شرایط مرجع حوضه به کار گرفته شد و سپس با ورودی‌های اقلیمی دوره تغییریافته اجرا شد. اختلاف میان دبی مشاهده شده و دبی شبیه‌سازی شده به‌عنوان مؤلفه غیراقلیمی تفسیر شد که می‌تواند بازتابی از اثرات توسعه شهری، تغییر کاربری اراضی، تغییر در نفوذپذیری سطح و سایر فرآیندهای انسانی باشد. بنابراین، نتایج این بخش بیانگر سهم منتسب‌شده به عوامل غیراقلیمی است و نباید به‌عنوان اثبات مستقیم علت‌مندی توسعه شهری تلقی شود.

در این مطالعه، جزء باقی‌مانده مدل به‌عنوان مؤلفه غیراقلیمی تفسیر شد که می‌تواند بازتابی از اثرات توسعه شهری، تغییر کاربری اراضی، تغییر در شرایط نفوذپذیری، برداشت آب یا سایر فرآیندهای مدل‌نشده باشد.

مقایسه سهم نسبی مؤلفه‌های اقلیمی و غیراقلیمی نشان داد تغییر رابطه بارش–رواناب در حوضه کن احتمالاً حاصل برهم‌کنش هم‌زمان این دو دسته عامل است و نمی‌توان آن را صرفاً به تغییر بارش نسبت داد.

در عین حال، باید توجه داشت که این چارچوب یک روش انتساب مبتنی بر مدل است و نتایج آن بیانگر شواهد تفسیری هستند؛ بنابراین نباید به‌عنوان اثبات مستقیم سهم قطعی هر عامل در تغییرات هیدرولوژیکی تلقی شوند.

تحلیل پنجره متحرک و پویایی مدل‌سازی

به‌منظور بررسی پویایی زمانی رابطه بارش–رواناب، از تحلیل پنجره متحرک ۱۰ ساله استفاده شد. در این تحلیل، علاوه بر شاخص‌های آماری کلاسیک، عملکرد مدل یادگیری ماشین (Random Forest) نیز در هر پنجره مورد ارزیابی قرار گرفت تا تغییر در پیش‌بینی‌پذیری (Predictability Shift) حوضه مشخص شود (Fig. 6- Ten year moving window analysis comparing the trends of statistical correlation coefficient (left axis) and machine learning model prediction accuracy (right axis). The simultaneous decline of both indicators after 2009 highlights reduced hydrological predictability of the watershed.

شکل ۵).

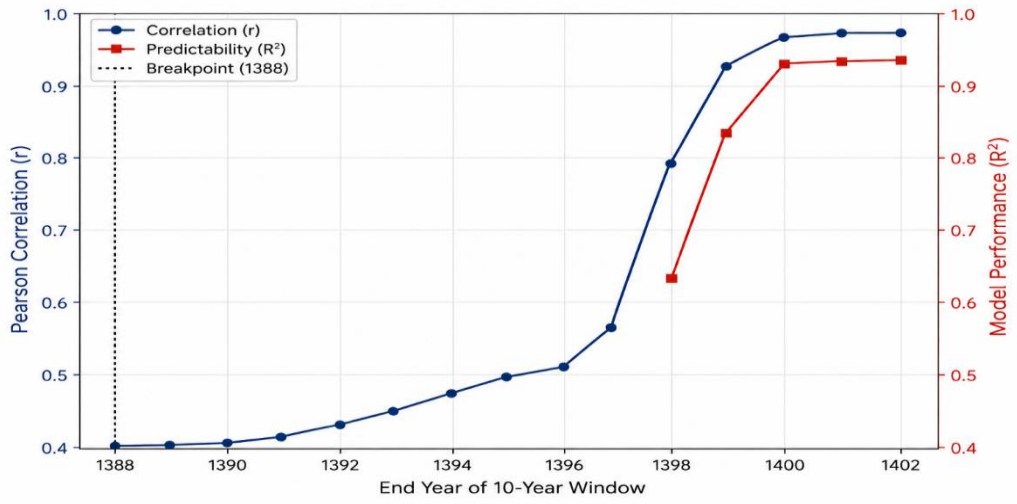


Fig. 6- Ten year moving window analysis comparing the trends of statistical correlation coefficient (left axis) and machine learning model prediction accuracy (right axis). The simultaneous decline of both indicators after 2009 highlights reduced hydrological predictability of the watershed.

شکل ۵- تحلیل پنجره متحرک ۱۰ ساله؛ مقایسه روند تغییرات ضریب همبستگی آماری (محور چپ) و دقت پیش‌بینی مدل یادگیری ماشین (محور راست). تضعیف همزمان هر دو شاخص پس از سال ۱۳۸۸، نشان‌دهنده کاهش پیش‌بینی‌پذیری هیدرولوژیکی حوضه است.

نتایج نشان می‌دهد که همبستگی آماری (r) و دقت مدل (R^2) تا پنجره منتهی به سال ۱۳۸۸ در سطوح پایداری قرار داشتند. اما پس از این مقطع، هر دو شاخص روند نزولی شدیدی را آغاز کرده‌اند. افت عملکرد مدل یادگیری ماشین در پنجره‌های متأخر ثابت می‌کند که رابطه فیزیکی بین ورودی (بارش) و خروجی (دبی) دچار پیچیدگی‌های غیرخطی جدیدی شده است که حتی مدل‌های هوشمند نیز در بازسازی آن با چالش مواجه‌اند. این پدیده تأییدکننده فرضیه گسست هیدرولوژیکی (Hydrological Decoupling) در حوضه کن است که احتمالاً ناشی از غلبه عوامل انسانی و تغییرات اقلیمی (تبخیر–تعرق) بر سیگنال‌های بارش در سال‌های اخیر می‌باشد.

تفسیر هیدرولوژیک و پیامدهای مدیریتی

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که رفتار هیدرولوژیکی حوضه کن در سال‌های اخیر از الگوی ایستای سنتی فاصله گرفته و پاسخ رواناب نسبت به گذشته دستخوش تغییر شده است. مشاهده هم‌زمان تغییر در ساختار رابطه بارش–رواناب، کاهش پایداری عملکرد مدل و افزایش سهم نسبی متغیرهای غیراقلیمی بیانگر آن است که فرآیندهای کنترل‌کننده رواناب احتمالاً پیچیده‌تر از وابستگی مستقیم به بارش شده‌اند.

از دیدگاه هیدرولوژیکی، چنین الگویی می‌تواند با تغییر در شرایط سطحی حوضه، تغییر مسیرهای انتقال جریان، تغییر ظرفیت ذخیره و نفوذ و همچنین تغییر در رفتار پاسخ رخدادهای بارشی سازگار باشد.

از منظر مدیریتی، نتایج این مطالعه چند پیام کلیدی دارد.

نخست، اتکای صرف به تحلیل بارش برای ارزیابی وضعیت منابع آب و خطر سیلاب در حوضه‌های شهری ممکن است منجر به برآورد ناقص از رفتار واقعی سامانه شود.

دوم، برنامه‌ریزی توسعه شهری باید همراه با پایش مستمر شاخص‌های هیدرولوژیکی و ارزیابی اثر تغییرات کاربری اراضی انجام گیرد.

سوم، استفاده از مدل‌های تبیین‌پذیر می‌تواند به‌عنوان ابزار تصمیم‌یار برای شناسایی محرک‌های غالب تغییر و اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی مورد استفاده قرار گیرد.

در نهایت، پیشنهاد می‌شود مطالعه‌های آینده با بهره‌گیری از سناریوهای مستقل کاربری اراضی، داده‌های تبخیر–تعرق، شاخص‌های نفوذناپذیری و مدل‌های فرایندمحور، عدم قطعیت موجود در انتساب سهم عوامل مختلف را کاهش دهند.

محدودیت‌های پژوهش

با وجود استفاده از مجموعه‌ای نسبتاً جامع از متغیرهای هیدرولوژیک، اقلیمی و سنجش‌ازدور، مقدار $R^2=0.616$ نشان می‌دهد که بخشی از تغییرپذیری دبی روزانه همچنان توسط مدل توضیح داده نمی‌شود. بنابراین، نتایج این پژوهش باید بیشتر در چارچوب تبیین رفتار سامانه و شناسایی روندهای غالب تفسیر شوند و برای کاربردهای کاملاً عملیاتی با احتیاط مورد استفاده قرار گیرند.

در عین حال، این مطالعه مبتنی بر چارچوب انتساب مدل‌محور است و نتایج آن نباید به‌عنوان اثبات مستقیم روابط علّی تفسیر شود. محدودیت در دسترسی به داده‌های مستقیم تغییرات نفوذناپذیری، برداشت آب و متغیرهای تبخیر–تعرق می‌تواند بر برآورد سهم نسبی عوامل اثرگذار تأثیرگذار باشد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، پویایی زمانی و رفتار هیدرولوژیک حوضه آبریز کن با استفاده از تحلیل تلفیقی داده‌های روزانه بارش و دبی در یک دوره آماری ۲۳ ساله، آزمون‌های آماری روند و نقطه شکست، تحلیل پنجره متحرک و چارچوب مدل‌سازی داده‌محور مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج کلیدی این پژوهش به شرح زیر است:

۱- ناایستایی رابطه بارش–رواناب و تضعیف پاسخ هیدرولوژیک: نتایج آزمون روند نشان داد که بارش سالانه دارای روند افزایشی معنادار است، اما دبی رودخانه روند نزولی تدریجی و از نظر آماری غیرمعنادار دارد. این وضعیت بیانگر آن است که با وجود افزایش بارش، پاسخ رواناب در حوضه تضعیف شده و نقش عوامل انسانی و تغییرات کاربری اراضی در تعدیل یا کاهش جریان سطحی پررنگ‌تر شده است.

۲. پاسخ هیدرولوژیکی سریع و رویداد–محور: تفاوت قابل‌توجه میان میانگین جریان روزانه (۲/۲۱ مترمکعب بر ثانیه) و دبی‌های اوج ثبت‌شده در حوضه (تا حدود ۵۸/۷ مترمکعب بر ثانیه) نشان می‌دهد که حوضه کن دارای پاسخ سیلابی سریع به رخدادهای بارشی شدید است. این دامنه نوسان گسترده و چولگی مثبت توزیع جریان، بیانگر نقش غالب رخدادهای حدی در شکل‌دهی رژیم هیدرولوژیکی حوضه بوده و آن را در برابر سیلاب‌های ناگهانی آسیب‌پذیر می‌سازد.

۳. تغییرات بارش–رواناب و نقش عوامل غیراقلیمی: مقایسه دبی مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده نشان داد که بخشی از تغییرات جریان با تغییرات اقلیمی قابل توضیح است، اما بخش باقیمانده مؤید نقش مؤلفه‌های غیراقلیمی است. با وجود آنکه متغیرهای مستقیم توسعه شهری در مدل وارد نشده‌اند، شواهد حاصل از شاخص‌های سنجش‌ازدور و چارچوب سناریوی متقابل نشان می‌دهد که تغییرات کاربری اراضی و گسترش سطوح ساخته‌شده احتمالاً در تضعیف پاسخ رواناب مؤثر بوده‌اند. با این حال، این نتیجه باید به‌عنوان استنباط مدل‌محور و نه اثبات مستقیم علیت تفسیر شود.

۴. پیامدهای مدیریتی و ضرورت رویکردهای نوین: با توجه به روند کاهشی دبی پایه و افزایش سهم رفتارهای حدی در رژیم جریان، فرض ایستایی در طراحی‌های هیدرولیکی برای این حوضه قابل اتکا نیست. بازنگری در معیارهای طراحی سازه‌ای، توسعه سامانه‌های هشدار سریع سیل، و اجرای طرح‌های آبخیزداری و آبخوان‌داری جهت تقویت تغذیه مصنوعی سفره‌های آب زیرزمینی دشت تهران در قالب مدیریت یکپارچه منابع آب ضروری است. همچنین بهره‌گیری از مدل‌های هوشمند تبیین‌پذیر (نظیر چارچوب مبتنی بر SHAP) می‌تواند ابزار مؤثری برای پایش تغییرات سامانه و تحلیل سهم نسبی عوامل اثرگذار فراهم آورد.

در مطالعه‌های آینده، استفاده از داده‌های مستقیم‌تر مربوط به تغییرات کاربری اراضی، سطوح نفوذناپذیر، برداشت آب و تبخیر–تعرق، در کنار مقایسه رویکردهای داده‌محور با مدل‌های فرایندمحور یا هیبریدی، می‌تواند به کاهش عدم‌قطعیت و بهبود انتساب سهم نسبی عوامل اقلیمی و انسانی در تغییرات رابطه بارش–رواناب کمک کند. به‌منظور کاربردی‌سازی نتایج این پژوهش، توسعه یک سامانه هوشمند تصمیم‌یار مبتنی بر داده‌های روزانه، مدل‌های یادگیری ماشین و روش‌های تبیین‌پذیر هوش مصنوعی برای پایش، پیش‌بینی و تحلیل سناریوهای بارش–رواناب در حوضه کن پیشنهاد می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسنده هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکرده است.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسنده اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده و این موضوع مورد تأیید ایشان است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده مقاله: مرتضی شکری، نگارش مقاله، تجزیه و تحلیل داده‌ها، بررسی نتایج و پاسخ به داوران گرامی

تقدیر و تشکر

نویسنده از همکاری ارزشمند شرکت آب منطقه‌ای تهران در خصوص تأمین و دسترسی به داده‌های مورد نیاز پژوهش، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نماید.

References

1- Addor, N., & Melsen, L. A. 2019. Legacy, rather than adequacy, drives the selection of hydrological models. *Water Resources Research*, *55*(1), 378-390. https://doi.org/10.1029/2018WR022958

2- Alijani, B., & Harman, J. R. 2019. Synoptic climatology of precipitation in Iran. *Annals of the Association of American Geographers*, *75*(3), 404-416. https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1985.tb00079.x

3- Allan, R. P., Barlow, M., Byrne, M. P., Cherchi, A., Douville, H., Fowler, H. J., Gan, T. Y., Pendergrass, A. G., Rosenfeld, D., Swann, A. L. S., Wilcox, L. J., & Zolina, O. 2023. Advances in understanding large-scale responses of the water cycle to climate change. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1472*(1), 49-75. https://doi.org/10.1111/nyas.14337

4- Alshammari, M. S., Alogayell, H. M., Markovic, S. B., & Mohamed, S. A. 2023. The impact of urban expansion on groundwater recharge and surface runoff. *Environmental Earth Sciences*, *82*(7), 173. https://doi.org/10.1007/s12665-023-10862-1

5- Arriagada, P., Karavitis, C. A., Gullotta, A., Guzman, C., Morales, B., Munoz, A., Fuster, R., & Link, O. (2024). Explainable artificial intelligence for hydrological modeling: An evaluation of SHAP for runoff

prediction. *Water Resources Research*, *60*(1), e2023WR034806. https://doi.org/10.1029/2023WR034806

6- Avand, M., Moradi, H., & Ramazanzadeh Lasboyee, M. 2024. Using machine learning models to predict spatiotemporal changes in rainfall and temperature in a semi-arid region: A case study of Iran. *Environmental Earth Sciences*, *83*(3), 89. https://doi.org/10.1007/s12665-023-11358-7

7- Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A., Perdigão, R. A. P., Parajka, J., Merz, B., Lun, D., Arheimer, B., Aronica, G. T., Bilibashi, A., Boháč, M., Bonacci, O., Borga, M., Čanjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G. B., Claps, P., Frolova, N., Ganora, D., … Živković, N. 2019. Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, *573*(7772), 108-111. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6

8- Fletcher, T. D., Andrieu, H., & Hamel, P. 2013. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources*, *51*, 261-279. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.09.001

9- Gaume, E., Borga, M., Llassat, M. C., Maouche, S., Lang, M., & Diakakis, M. 2016. Mediterranean extreme floods and flash floods. In *The Mediterranean region under climate change: A scientific update* (pp. 133-144). IRD Éditions. https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.23181

10- Gimeno, L., Algarra, I., Eiras-Barca, J., Ramos, A. M., & Nieto, R. 2022. Atmospheric rivers and their contribution to precipitation and extreme events. *Frontiers in Earth Science*, *10*, 841646. https://doi.org/10.3389/feart.2022.841646

11- Guo, D., Westra, S., & Maier, H. R. 2020. An inverse approach to perturb historical rainfall data for scenario-neutral climate impact studies. *Journal of Hydrology*, *556*, 877-890. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.025

12- Huang, S., Li, Y., & Chen, X. 2024. Improving the explainability of CNN-LSTM-based flood prediction with integrating SHAP technique. *Ecological Informatics*, *80*, 102904. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102904

13- Jiang, S., Zheng, Y., & Solomatine, D. 2020. Improving AI system awareness of geoscience knowledge: Symbiotic integration of physical approaches and deep learning. *Geophysical Research Letters*, *47*(13), e2020GL088229. https://doi.org/10.1029/2020GL088229

14- Kratzert, F., Klotz, D., Brenner, C., Schulz, K., & Herrnegger, M. 2018. Rainfall–runoff modelling using Long Short-Term Memory (LSTM) networks. *Hydrology and Earth System Sciences*, *22*(11), 6005-6022. https://doi.org/10.5194/hess-22-6005-2018

15- Kratzert, F., Klotz, D., Shalev, G., Klambauer, G., Hochreiter, S., & Nearing, G. 2019. Towards learning universal, regional, and local hydrological behaviors via machine learning applied to large-sample datasets. *Hydrology and Earth System Sciences*, *23*(12), 5089-5110. https://doi.org/10.5194/hess-23-5089-2019

16- Li, X., Zhao, Y., Shi, C., Sha, J., Wang, Z.-L., & Wang, Y. 2021. Application of Water Evaluation and Planning (WEAP) model for exploring the water deficit at catchment level in Beijing. *Water Resources Management*, *35*(6), 2041-2055. https://doi.org/10.1007/s11269-021-02820-8

17- Liu, J., Chen, X., Zhang, J., & Flury, M. 2021. Coupling the Budyko framework and the Ponce-Shetty model to explore the influence of climate and land surface changes on hydrological processes. *Journal of Hydrology*, *603*, 126905. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126905

18- Lundberg, S. M., & Lee, S.-I. 2017. A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*, *30*, 4765-4774. https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.07874

19- Marchi, L., Borga, M., Preciso, E., & Gaume, E. 2010. Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. *Journal of Hydrology*, *394*(1-2), 118-133. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.017

20- Merz, B., Basso, S., Fischer, S., Lun, D., Blöschl, G., Merz, R., Guse, B., Viglione, A., Vorogushyn, S., Macdonald, E., Wietzke, L., & Schumann, A. (2022). Understanding heavy tails of flood peak distributions. *Water Resources Research*, *58*(6), e2021WR030506. https://doi.org/10.1029/2021WR030506

21- Molnar, C. 2022. *Interpretable machine learning: A guide for making black box models explainable* (2nd ed.). https://christophm.github.io/interpretable-ml-book/

22- Nearing, G. S., Kratzert, F., Sampson, A. K., Pelissier, C. S., Klotz, D., Frame, J. M., Prieto, C., & Gupta, H. V. 2021. What role does hydrological science play in the age of machine learning? *Water Resources Research*, *57*(3), e2020WR028091. https://doi.org/10.1029/2020WR028091

23- Panikkar, U. R., Srivastav, R., & Srivastava, A. 2023. Multiscale variability of hydrological responses in urbanizing watershed. *Remote Sensing*, *15*(3), 796. https://doi.org/10.3390/rs15030796

24- Salas, J. D., Anderson, M. L., Papalexiou, S. M., & Frances, F. 2022. PMP and climate variability and change: A review. *Journal of Hydrologic Engineering*, *27*(3), 03121001. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002134

25- Shen, C. 2018a. A transdisciplinary review of deep learning research and its relevance for water resources scientists. *Water Resources Research*, *54*(11), 8558-8593. https://doi.org/10.1029/2018WR022643

26- Shen, C., Laloy, E., Elshorbagy, A., Albert, A., Bales, J., Chang, F.-J., Ganguly, S., Hsu, K.-L., Kifer, D., Fang, Z., Fang, K., Li, D., Li, X., & Tsai, W.-P. 2018b. HESS Opinions: Incubating deep-learning-powered hydrologic science advances as a community. *Hydrology and Earth System Sciences*, *22*(11), 5639-5656. https://doi.org/10.5194/hess-22-5639-2018

27- Slater, L. J., Anderson, B., Buechel, M., Dadson, S., Han, S., Harrigan, S., Kelder, T., Kowal, K., Lees, T., Matthews, T., Murphy, C., & Wilby, R. L. 2021. Nonstationary weather and water extremes: A review of methods for their detection, attribution, and management. *Hydrology and Earth System Sciences*, *25*(7), 3897-3935. https://doi.org/10.5194/hess-25-3897-2021

28- Tahroudi, M. N., & Mirabbasi, R. 2024. Evaluating the efficiency and accuracy of the copula-based rainfall-runoff model. *Earth Science Informatics*, *17*(4), 3121–3136. https://doi.org/10.1007/s12145-024-01594-y

29- Tamm, O., Saaremäe, E., Rahkema, K., Jaagus, J., & Tamm, T. 2023. The intensification of short-duration rainfall extremes due to climate change – Need for a frequent update of intensity–duration–frequency curves. *Climate Services*, *30*, 100349. https://doi.org/10.1016/j.cliser.2023.100349

30- Xu, X., Yang, D., Yang, H., & Lei, H. 2022. Attribution analysis based on the Budyko hypothesis for detecting the dominant cause of runoff decline in Haihe basin. *Journal of Hydrology*, *510*, 530-540. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.052.

31- Zhou, Q., Leng, G., Su, J., & Ren, Y. 2023. Comparison of urbanization and climate change impacts on urban flood volumes: Importance of urban planning and drainage adaptation. *Science of The Total Environment*, *658*, 24-33. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.184

EXTENDED ABSTRACT

Impacts of Climate Variability and Urban Expansion on Rainfall–Runoff Relationship Changes in the Kan River Basin, Tehran: An Explainable Artificial Intelligence Approach

Morteza Shokri

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.(M.Shokri@basu.ac.ir)

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received:
Revised:
Accepted:
Available online:

Keywords:
Rainfall–Runoff Relationship; Urban Development; Climate Variability; Explainable Artificial Intelligence; Kan River Watershed.

TO CITE THIS ARTICLE:

Abstract

Climate variability and rapid urban expansion are major drivers of hydrological alteration in urban basins; however, decoupling their relative contributions to rainfall–runoff dynamics remains challenging due to complex nonlinear interactions. This study investigates the temporal evolution of the rainfall–runoff relationship in the Kan River basin, northern Tehran, Iran, by assessing the relative influence of climatic variability and urban growth using an explainable artificial intelligence (XAI) framework. Daily hydrological and meteorological observations (2000–2023) were integrated with remote sensing indices (NDVI, NDBI) and anthropogenic metrics. Trend and non-stationarity analyses (Mann–Kendall and Pettitt tests) were initially conducted to detect structural regime shifts. Subsequently, machine learning models (Random Forest and XGBoost) were developed to simulate daily discharge, coupled with SHapley Additive exPlanations (SHAP) to quantify and interpret feature importance. The results revealed significant temporal shifts in the rainfall–runoff relationship following an identified breakpoint. The machine learning models demonstrated high accuracy in capturing nonlinear hydrological responses. SHAP interpretability indicated that while precipitation-related variables remained the primary drivers of discharge variability, urban expansion indicators contributed substantially as secondary drivers, particularly during peak development periods. Overall, the findings demonstrate the compound impacts of climate and urbanization on watershed hydrology. The proposed explainable framework offers actionable insights for urban flood risk mitigation, sustainable watershed planning, and climate adaptation strategies in rapidly developing metropolitan catchments.

Introduction

Rainfall–runoff relationships in urbanizing watersheds are increasingly affected by the combined influence of climate variability and rapid land-use transformation. In highly developed basins, hydrological responses often deviate from long-term stationary behavior as a result of both meteorological shifts and anthropogenic pressure (Zhou et al., 2023). The Kan River basin, located in the northwestern part of Tehran, is a sensitive urban watershed where accelerated urban expansion, surface sealing, and modification of local landscape conditions have potentially altered runoff generation processes. Understanding the relative contribution of climatic and human-induced drivers to these changes is essential for effective urban water resources planning and flood-risk management.

This study investigates temporal changes in the rainfall–runoff relationship in the Kan River basin and evaluates the extent to which climate variability and urban development have contributed to observed hydrological changes. To overcome the limitations of conventional black-box predictive models, an explainable artificial intelligence framework was adopted to improve interpretability and provide physically meaningful insights into model behavior (Jiang et al., 2020). The study integrates hydrological observations, climatic data, and remotely sensed indicators of urban development to analyze the dynamics of runoff response over time.

Methodology

Daily precipitation and discharge records were collected and preprocessed to ensure temporal consistency and data quality. In addition, remote sensing-derived variables representing urban expansion and land-surface conditions were incorporated to capture the anthropogenic dimension of watershed change. The analysis began with trend and non-stationarity assessment to detect temporal shifts in hydrometeorological behavior and identify possible change-point conditions in the rainfall–runoff system.

Subsequently, machine learning models were developed to simulate daily discharge response from the selected climatic, hydrological, and urban indicators. Among the tested algorithms, Random Forest and XGBoost were used to capture nonlinear relationships and interactions among predictors. To interpret the contribution of individual variables, SHAP (Shapley Additive exPlanations) was applied. This approach allowed the relative importance, direction, and marginal effect of each predictor on runoff response to be quantified in a transparent manner (Arriagada et al., 2024). The overall framework provided both predictive capability and explanatory power, which is particularly valuable in complex urban watersheds where multiple drivers operate simultaneously.

Results and Discussion

The results indicate that the rainfall–runoff relationship in the Kan River basin has undergone a significant temporal change over the study period. Statistical analyses revealed evidence of non-stationarity and a detectable shift in hydrological behavior, suggesting that the runoff response has become increasingly influenced by factors beyond precipitation alone (Salas et al., 2022). The machine learning models successfully captured the nonlinear structure of the rainfall–runoff process and demonstrated satisfactory predictive performance.

SHAP-based interpretation showed that precipitation remained the dominant driver of daily runoff variability; however, indicators of urban development also exerted a meaningful influence. Variables related to land-cover transformation and urban expansion contributed to changes in runoff sensitivity, especially during periods of intensified urbanization. The findings support the view that both climate variability and anthropogenic development have jointly shaped the observed hydrological evolution of the basin. The explainable AI framework clarified how the magnitude and importance of predictors changed, providing evidence that runoff dynamics in the Kan basin must be interpreted in the context of rapid urban growth.

Conclusions

This study confirms that the Kan River basin has experienced a measurable alteration in its rainfall–runoff relationship under the combined pressure of climate variability and urban expansion. By integrating hydrological data, climatic observations, remote sensing indicators, machine learning, and explainable artificial intelligence, the research provides a comprehensive framework for understanding hydrological change in an urbanizing watershed.

The main contribution of the study lies in showing that precipitation remains the primary control on runoff generation, but urban development has become an increasingly important secondary driver. The use of SHAP made it possible to move beyond black-box prediction and provide a more interpretable assessment of the factors influencing runoff change. Such evidence can support urban flood management, watershed planning, and climate adaptation strategies in Tehran and other rapidly expanding metropolitan basins.

Overall, the proposed framework is suitable for diagnosing hydrological non-stationarity and for distinguishing the relative contributions of climatic and anthropogenic drivers in urban watersheds. The findings highlight the need for integrated water resources management approaches that consider both environmental change and urban growth in future planning.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct. Confirmation.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

The authors state that they have not used generative AI or AI-assisted technologies in their manuscript.

Authors' contribution

Author: Morteza Shokri, Writing – original draft; Formal data analysis; Interpretation of results; Manuscript revision and response to reviewer comments.

Acknowledgment

The author sincerely thank the Tehran Regional Water Company for its invaluable cooperation in providing the necessary data for this study.

References

1- Arriagada, P., Karavitis, C. A., Gullotta, A., Guzman, C., Morales, B., Munoz, A., Fuster, R., & Link, O. 2024. Explainable artificial intelligence for hydrological modeling: An evaluation of SHAP for runoff prediction. *Water Resources Research*, *60*(1), e2023WR034806. https://doi.org/10.1029/2023WR034806

2- Jiang, S., Zheng, Y., & Solomatine, D. 2020. Improving AI system awareness of geoscience knowledge: Symbiotic integration of physical approaches and deep learning. *Geophysical Research Letters*, *47*(13), e2020GL088229. https://doi.org/10.1029/2020GL088229

3- Salas, J. D., Anderson, M. L., Papalexiou, S. M., & Frances, F. (2022). PMP and climate variability and change: A review. *Journal of Hydrologic Engineering*, *27*(3), 03121001. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002134

4- Zhou, Q., Leng, G., Su, J., & Ren, Y. 2023. Comparison of urbanization and climate change impacts on urban flood volumes: Importance of urban planning and drainage adaptation. *Science of The Total Environment*, *658*, 24-33. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.184